

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Dimensionamento de Volantes de Inércia para
Evitar Problemas de Estabilidade da Frequência
em Redes Isoladas com Elevada Geração
Fotovoltaica**

Pedro Luís Jesus Almeida

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientadora: Prof. Doutora Maria Helena Osório Pestana de Vasconcelos

Julho de 2013

Resumo

Nesta dissertação foi desenvolvida uma aplicação para fornecer o dimensionamento ótimo de um sistema de armazenamento de energia, que efetue o controlo primário da frequência com resposta rápida, a instalar numa rede isolada com elevada integração de produção renovável. Este tipo de redes merece particular atenção, dado que não estando ligada a uma grande rede é mais difícil fazer com que os valores da frequência se mantenham dentro da gama de valores admissíveis, devido às variações suscetíveis de ocorrer na produção renovável, mas também devido ao baixo valor de inércia do sistema.

Desta forma, a grandeza a que se dá especial atenção no presente trabalho é a frequência. É estudada a variação desta grandeza na resposta do sistema face a perturbações. Estas consistem em variações que a produção renovável experimenta.

A aplicação recorre a simulações do sistema elétrico, supondo um modelo simplificado de barramento único, utilizando a plataforma de simulação *Simulink*[®], disponível no *MatLab*[®]. Para encontrar o dimensionamento ótimo do sistema de armazenamento de energia foi aplicado o EPSO, como método de otimização.

Como teste à consistência da aplicação foi utilizada uma rede isolada, de características reais, fornecida pela orientadora. A produção de energia elétrica, nesta rede, é assegurada por uma central a Diesel, dois parques eólicos e dois parques fotovoltaicos. Encontrou-se o dimensionamento ótimo de um sistema de armazenamento de energia, neste caso de um volante de inércia, que garanta a segurança de operação para diferentes tipos de perturbações que o sistema pode sofrer. Tendo em conta os valores do desvio de frequência obtidos nas simulações verificou-se a necessidade de instalação daquele tipo de sistema para garantir a qualidade de serviço e evitar deslastre de carga em caso de falha da produção renovável.

Abstract

In this dissertation, an application was developed to provide the optimal dimensioning of an energy storage system, that provides fast acting primary frequency control, to be installed on an isolated grid with high integration of renewable energy. Such kind of networks deserves special attention since it is not linked to a large network, it is more difficult to make the frequency values remain within the range of allowable values due to variations likely to occur to renewable generation, but also due to low value of inertia of the system.

So, in this work it is given special attention to the frequency of the grid. It is studied the variation of this magnitude within the system response to disturbance. These disturbances consist in variations on the renewable production.

The application uses simulations of the electrical system, assuming a simplified single-busbar model, using the simulation platform Simulink®, available in MatLab®. To find the optimum dimensioning of the energy storage system, an EPSO optimization algorithm was applied.

As a test of consistency of the application, this was used on an isolated grid, with real characteristics, provided by the supervisor of this work. The production of electricity in this grid is insured by a Diesel power plant, two wind farms and two photovoltaic parks. It was found the optimum dimensioning of the energy storage system, in this case a flywheel system, that is able to guard system security for different types of disturbances that the system may suffer. Given the values of the frequency shift obtained in the simulations, it was verified the need to install that kind of system in order to ensure quality of service and avoid load shedding in case of failure in renewable generation.

Agradecimentos

A realização desta dissertação só foi possível devido à contribuição direta ou indireta de diversas pessoas, a quem pretendo, desta forma demonstrar o meu mais reconhecido agradecimento.

À minha orientadora, Prof. Doutora Maria Helena Osório Pestana de Vasconcelos, pelo tempo disponibilizado para esclarecimento de dúvidas, pela paciência, pelos comentários e conselhos dados durante a execução do trabalho, assim como pelo fornecimento de alguns dados e bibliografia, fundamentais para a realização da presente dissertação.

A toda a minha família, em especial aos meus pais, António Luís Pinheiro de Almeida e Maria Rosa Jesus Alminhas Almeida, pela educação, pela oportunidade que me deram de poder estudar e pelo apoio ao longo da minha vida.

À Eugénia Xavier, minha namorada, pelo carinho, conforto e motivação não só durante a realização desta dissertação, mas também ao longo de todo o curso.

A todos os meus colegas e amigos pelo apoio, união e partilha de momentos que ficarão para sempre na minha memória.

A todos o meu sincero obrigado...

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xiii
Abreviaturas	xv
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Considerações Gerais.....	1
1.2 - Objetivos da Dissertação	2
1.3 - Estrutura da Dissertação.....	2
Capítulo 2	3
Sistemas de Armazenamento de Energia	3
2.1 - Introdução.....	3
2.2 - Volantes de Inércia	4
2.3 - Baterias.....	6
2.4 - Supercondensadores.....	10
2.5 - Conclusões	11
Capítulo 3	13
Metodologia Implementada	13
3.1 - Descrição do Problema Técnico a Resolver	13
3.2 - Método de Otimização	16
3.3 - Função Objetivo e Restrições.....	18
3.4 - Conclusões	19
Capítulo 4	21
Caso de Estudo	21
4.1 - Constituição do SEE	21
4.2 - Despacho	23
4.3 - Regulador de Velocidade	24

4.4 - Modelo Dinâmico Utilizado no <i>Simulink</i> ®	25
4.5 - Perturbações	27
4.6 - Resultados das Simulações	30
4.7 - Conclusões	38
Capítulo 5	41
Conclusões e Possível Trabalho Futuro	41
5.1 - Principais Contribuições	41
5.2 - Perspetivas de Desenvolvimento	41
Referências	43
Anexo A.....	47
Manual do Utilizador	47

Lista de figuras

Figura 2.1 - Partes constituintes de um volante de inércia [4]	5
Figura 2.2 - Processo de carga e descarga de uma bateria convencional [18]	7
Figura 2.3 - Aspetos construtivos de um sistema de bateria de vanádio [9]	9
Figura 3.1 - Desvio da frequência em função da variação da potência ativa	15
Figura 3.2 - Diagrama de blocos do dispositivo de armazenamento de energia [33]	16
Figura 3.3 - Ilustração do movimento de uma partícula Xi [33]	17
Figura 4.1 - Contribuição de cada tipo de produção para o potência total instalada	22
Figura 4.2 - Despacho para a produção térmica e renováveis	23
Figura 4.3 - Diagrama de blocos do regulador típico utilizado	25
Figura 4.4 - Modelo utilizado no <i>Simulink</i> [®] para a representação da rede	26
Figura 4.5 - Modelo contido no bloco correspondente ao sistema de regulação primária da frequência da central térmica	26
Figura 4.6 - Perturbação 1: Saída intempestiva de toda a produção fotovoltaica	28
Figura 4.7 - Desvio de frequência do sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 1 sem instalação de um sistema de armazenamento de energia	28
Figura 4.8 - Perturbação 2: Variação de 50% da produção fotovoltaica em conjunto com 20% de produção eólica durante 5 segundos mantendo-se estável durante 10 segundos de cada ciclo	29
Figura 4.9 - Perturbação 3: Variação de 50% da produção fotovoltaica durante 5 segundos mantendo-se estável 10 segundos de cada ciclo	29
Figura 4.10 - Desvio de frequência do sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 2 sem instalação de um sistema de armazenamento de energia	29
Figura 4.11 - Desvio de frequência do sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 3 sem instalação de um sistema de armazenamento de energia	30
Figura 4.12 - Desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 1 com instalação do volante de inércia ótimo	32

Figura 4.13 - Energia libertada pelo volante de inércia durante a ocorrência da perturbação 1.....	32
Figura 4.14 - Desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 2 com instalação do volante de inércia ótimo	33
Figura 4.15 - Energia libertada pelo volante de inércia durante a ocorrência da perturbação 2.....	34
Figura 4.16 - Desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 1 com instalação do volante de inércia ótimo	35
Figura 4.17 - Desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 3 com instalação do volante de inércia ótimo	35
Figura 4.18 - Energia libertada pelo volante de inércia durante a ocorrência da perturbação 1.....	35
Figura 4.19 - Energia libertada pelo volante de inércia durante a ocorrência da perturbação 3.....	36
Figura 4.20 - Desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 1 com instalação do volante de inércia ótimo	37
Figura 4.21 - Desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 2 com instalação do volante de inércia ótimo	37
Figura 4.22 - Energia libertada pelo volante de inércia durante a ocorrência da perturbação 1.....	37
Figura 4.23 - Energia libertada pelo volante de inércia durante a ocorrência da perturbação 2.....	38

Lista de tabelas

Tabela 4.1 - Potências instaladas da rede em estudo	22
Tabela 4.2 - Características dos geradores que constituem a central térmica	23
Tabela 4.3 - Valor da carga, perdas e produção	23
Tabela 4.4 - Soluções possíveis para o pré-despacho da central térmica	24
Tabela 4.5 - Valores considerados para os parâmetros do regulador de velocidade	25
Tabela 4.6 - Descrição das perturbações consideradas nas simulações da resposta da rede isolada em estudo	27
Tabela 4.7 - Valores dos parâmetros introduzidos na aplicação	31
Tabela 4.8 - Características do volante de inércia ótimo face à perturbação 1	31
Tabela 4.9 - Características do volante de inércia ótimo face à perturbação 2	33
Tabela 4.10 - Características do volante de inércia ótimo face à perturbação 1 em conjunto com a perturbação 3.....	34
Tabela 4.11 - Características do volante de inércia ótimo face à perturbação 1 em conjunto com a perturbação 2.....	36

Abreviaturas

AC	Corrente Alternada
AGC	<i>Automatic Generation Control</i>
DC	Corrente Contínua
EPSO	<i>Evolutionary Particle Swarm Optmization</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
RG	Reserva Girante
SEE	Sistema Elétrico de Energia
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Considerações Gerais

Na atualidade, a produção de energia elétrica é assegurada através de grandes centrais térmicas, nucleares e hídricas, na sua maioria longe dos grandes centros consumidores, sendo por isso a energia transportada por longas distâncias e posteriormente distribuída pelos consumidores. Esta situação não só implica maiores custos de produção, resultado das perdas de transporte e distribuição, mas também uma grande dependência dos combustíveis fósseis. Como se sabe, estes são produzidos, na sua maioria, em países instáveis do ponto de vista político, facto que provoca flutuações frequentes do seu preço. Estes aspetos juntamente com as preocupações ambientais, fazem com que seja necessário tomar medidas.

Nesse sentido, a União Europeia definiu um lote de metas bastante ambiciosas, nomeadamente, a redução da emissão de gases poluentes em pelo menos 20% até 2020, o aumento da eficiência energética em 20% até 2020 e o aumento da quota da produção de energia renovável para os 20% em 2020 [1]. Para isso, a principal medida a implementar é aumentar a integração de produção de energia renovável e, consequentemente, diminuir a produção de energia através de centrais térmicas e nucleares.

Nos últimos anos tem-se vindo a verificar uma crescente integração de parques eólicos no sistema elétrico, onde se têm registado grandes avanços tecnológicos, nomeadamente ao nível da eletrónica de potência, que permitiram que esta integração se processasse sem causar grandes perturbações. Mais recentemente, começou a apostar-se na construção de parques fotovoltaicos, no entanto existem ainda algumas preocupações quanto à sua integração nas redes, uma vez que esta produção está sujeita a intermitências de grande amplitude sempre que o sol é coberto/descoberto por uma nuvem [2].

A exploração dos parques eólicos e fotovoltaicos é ainda mais importante numa rede isolada, como por exemplo uma ilha, dado que para além da dependência dos combustíveis fósseis, há o problema do seu custo de transporte do território continental para a ilha. Assim, torna-se fundamental que se realizem estudos de avaliação do comportamento deste tipo de redes face à integração da produção renovável.

Neste sentido, a motivação desta dissertação é criar uma aplicação que minimize o custo de investimento do dispositivo de armazenamento de energia a instalar numa rede isolada, que seja capaz de efetuar controlo primário da frequência com resposta rápida. Se for

devidamente dimensionado, este tipo de dispositivo tem capacidade para evitar o aparecimento de problemas de estabilidade de frequência, face às perturbações que podem advir da elevada integração de produção renovável neste tipo de rede.

1.2 - Objetivos da Dissertação

O presente trabalho teve como objetivo criar uma aplicação em ambiente *MatLab*[®] para dimensionar um dispositivo de armazenamento de energia com intuito de melhorar a qualidade de serviço, nomeadamente a estabilidade de frequência, de uma rede isolada, com elevada integração de energias renováveis (eólica e fotovoltaica). Esta aplicação foi testada através de um caso de estudo fornecido pela orientadora.

Para realizar a referida tarefa foi necessário recorrer à plataforma de simulação *Simulink*[®], que se encontra disponível no *MatLab*[®], onde se fizeram diversas simulações que foram avaliadas através de um método de otimização, com vista a encontrar a melhor solução do ponto de vista económico. O método de otimização utilizado foi o *Evolutionary Particle Swarm Optimization* (EPSO), que foi fornecido pela orientadora através de uma ferramenta em ambiente *MatLab*[®]. A realização das simulações teve como objetivo estudar a resposta do sistema face a determinadas perturbações pré-definidas. Estas perturbações consistiram em variações, intempestivas ou frequentes, da produção eólica e/ou fotovoltaica. O modelo dinâmico utilizado para analisar o sistema é simplificado, ou seja, é de barramento único, e envolve a modelização dos sistemas de regulação de frequência e potência ativa. De salientar que a rede isolada em estudo possui características reais, cujos dados foram fornecidos pela orientadora.

1.3 - Estrutura da Dissertação

O presente documento está estruturado em 5 capítulos e 1 anexo.

Neste primeiro capítulo está presente a contextualização do trabalho, assim como os seus objetivos.

O Capítulo 2 é dedicado aos sistemas de armazenamento de energia, nomeadamente, aos volantes de inércia, baterias e supercondensadores. É referido o seu funcionamento, características e aplicações.

É no Capítulo 3 que é descrita a metodologia implementada para fornecer o dimensionamento ótimo do sistema de armazenamento de energia a instalar numa rede isolada, com o intuito de evitar o aparecimento de problemas de estabilidade de frequência. Neste capítulo é apresentada a descrição do problema técnico a resolver, o funcionamento do método de otimização utilizado, assim como a função objetivo e as restrições do problema.

No Capítulo 4 é apresentado o caso de estudo fornecido pela orientadora. Inicialmente identificam-se os aspetos relacionados com o sistema elétrico em estudo, mais concretamente as características dos seus componentes. Em seguida, são apresentados os resultados das simulações efetuadas. É feita também, neste capítulo, a análise e as conclusões que se tiram dos resultados obtidos.

O Capítulo 5 diz respeito às contribuições da dissertação bem como às perspetivas futuras de desenvolvimento.

No Anexo A apresenta-se o manual do utilizador da aplicação desenvolvida.

Capítulo 2

Sistemas de Armazenamento de Energia

2.1 - Introdução

O valor da frequência de um sistema é afetado sempre que existe um desequilíbrio entre o valor da produção de potência mecânica e da potência elétrica, ao nível dos geradores síncronos tradicionais. Este facto provoca um desvio do valor da frequência relativamente ao seu valor nominal, desvio esse que é positivo no caso de haver excesso de potência mecânica e negativo caso a potência elétrica ultrapasse o valor da potência mecânica. A crescente integração de energia elétrica proveniente de fontes renováveis nos sistemas um pouco por todo o mundo, relacionada com preocupações económicas e ambientais, originou uma maior instabilidade no valor da frequência. Esta situação acontece devido à intermitência destas fontes, essencialmente decorrente da dificuldade que existe para a sua previsão [3]. Além disso, quanto maior for a integração de energias renováveis, menos produção é atribuída aos geradores convencionais, o que provoca a saída de serviço de alguns destes, diminuindo desta forma a inércia do sistema, tornando-o ainda mais instável, facto agravado se estivermos a falar de pequenas redes isoladas [4].

Por motivos de segurança e operacionalidade do sistema, torna-se fundamental que a frequência se mantenha dentro dos limites técnicos estabelecidos, dessa forma todas as redes possuem determinados valores de reserva para colmatar as falhas na produção, e assim estabilizar a frequência. De modo geral, esta reserva consiste na reserva girante e reserva rápida. A reserva girante é a capacidade que os grupos geradores, que já se encontram em funcionamento, de aumentarem a sua produção até atingirem o seu máximo. Por sua vez, a reserva rápida consiste em grupos (térmicos e hídricos) que estão parados, mas a postos para entrar em serviço mal lhes seja dada ordem para tal [5]. Na realidade, o que acontece é que estes grupos, embora sejam rápidos quando comparados a outros, podem demorar até 10 minutos a entrar em funcionamento, um tempo demasiado elevado no que respeita à regulação de frequência, na ordem dos segundos.

A capacidade cíclica e a eficiência de um sistema de armazenamento de energia são duas características muito importantes para a sua compreensão. A capacidade cíclica é definida como o número máximo de ciclos carga-descarga que o sistema é capaz de realizar durante o seu serviço. Por sua vez, a eficiência é a quantidade de energia elétrica que o sistema consegue fornecer por cada unidade de energia elétrica que absorve [6].

Atendendo às características de cada solução tecnológica, os sistemas de armazenamento podem ser enquadrados em termos de aplicabilidade em potência e/ou energia. Uma aplicação em potência requer uma disponibilidade elevada de potência, normalmente durante períodos relativamente curtos de tempo (entre segundos e alguns minutos) [7]. Como tal, exige um tempo de resposta muito reduzido (entre algumas dezenas de milissegundos e alguns segundos). Uma aplicação em energia requer uma disponibilidade de energia elevada, assim como uma considerável duração de descarga (entre muitos minutos e algumas horas). Neste tipo de aplicação, as exigências em termos de tempo de resposta são menores e mais variáveis.

Neste sentido, como forma de resolver o problema de estabilidade de frequência nos sistemas elétricos, deve ser incluído um sistema de controlo de frequência de resposta rápida, que tenha a capacidade de produzir uma grande quantidade de potência, durante um curto período de tempo. Este tipo de controlo de potência de ação rápida pode ser eficientemente fornecido por sistemas de armazenamento de energia que tenham elevada capacidade de potência e que não tenham requisitos especiais para o local de instalação, como é o caso dos volantes de inércia, baterias ou supercondensadores [8].

De referir, que a Dissertação "Otimização do Planeamento de Sistemas de Armazenamento de Energia Distribuído em Redes com Elevada Produção Dispersa" do Ismael Tiago Sá Miranda, é um trabalho anterior onde se pode encontrar uma caracterização de sistemas de armazenamento de energia. Tendo a caracterização presente neste capítulo se baseado em parte nesse trabalho.

2.2 - Volantes de Inércia

Os volantes de inércia, *flywheels* na literatura anglo-saxónica, são dispositivos que armazenam energia sob a forma de energia cinética num cilindro maciço capaz de rodar a altas velocidades (mais de 20.000 rotações por minuto (r.p.m.)). Existem diferentes tipos de volantes de inércia, cada um com características diferentes consoante o tipo de materiais constituintes do seu cilindro e do tipo de máquina motor/gerador, podendo ser classificados quanto à sua velocidade de rotação: baixa velocidade ou alta velocidade. Os volantes de baixa velocidade são normalmente feitos de aço, enquanto que os de alta velocidade são normalmente feitos de fibra de carbono e vidro, visto que são materiais que aguentam melhor o desgaste provocado pelas rotações. Este último tipo cria preocupações quanto às perdas por fricção. Desse modo, este tipo de volante é colocado dentro de um compartimento em vácuo e possui rolamentos magnéticos que não têm qualquer contato com o volante, não necessitam de lubrificação nem possuem partes móveis. Estes rolamentos suportam o peso do volante de inércia, através de forças magnéticas repulsivas que são controladas por sistemas bastante sofisticados [1].

A máquina motor/gerador pode ser assíncrona, de relutância variável ou de ímanes permanentes. O tipo de máquina influencia principalmente a densidade de potência do sistema e o seu custo. Enquanto a máquina assíncrona permite um menor custo para o sistema, mas também uma densidade de potência mais reduzida, a máquina de ímanes permanentes possui uma densidade de potência e um custo maior. As necessidades do sistema indicará a melhor solução a implementar.

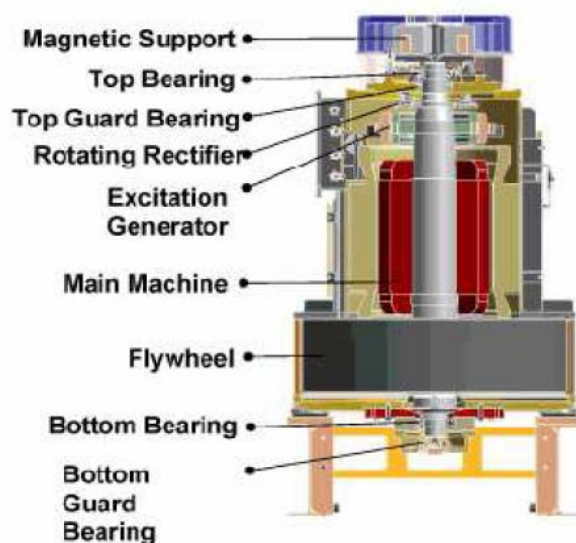


Figura 2.1 - Partes constituintes de um volante de inércia [4]

A quantidade de energia armazenada num volante de inércia depende da massa e geometria do corpo rotativo, assim como, da sua velocidade de rotação:

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (2.1)$$

onde E é a energia cinética (J ou Ws), J é a inércia do corpo rotativo (kg.m^2) e ω é a velocidade angular (rad/s) [1].

Através da expressão 2.1 constata-se que a energia cinética que um volante é capaz de armazenar é proporcional à inércia do cilindro e ao quadrado da sua velocidade angular, sendo assim, torna-se mais eficaz aumentar a capacidade de armazenamento pelo aumento da velocidade de rotação, do que através da sua inércia. Atualmente, as velocidades de rotação destes dispositivos já atingem as 100.000 r.p.m. [9].

Os volantes de inércia, quando integrados num SEE, têm dois tipos de comportamento distintos. No caso de existir excesso de potência mecânica nos geradores convencionais em relação à potência elétrica, o volante absorve energia da rede, tendo um funcionamento semelhante a uma carga. No caso da potência mecânica ser inferior à potência elétrica, o volante começa a descarregar, fornecendo energia à rede [1]. No primeiro caso, a energia é acumulada pela aceleração do cilindro a altas velocidades, utilizando a máquina motor/gerador como motor. No segundo caso, quando o volante de inércia descarrega, o cilindro perde velocidade, sendo usado o motor/gerador como gerador para fornecer energia.

Os sistemas de armazenamento de energia baseados em *flywheels* são sistemas modulares, podendo ser dispostos em série ou paralelo, consoante as características de potência e energia necessárias.

A capacidade cíclica dos volantes de inércia (superior a 100.000 ciclos [10]) não é afetada pelas suas condições de operação, nomeadamente a profundidade das descargas e o estado de carga médio [11]. É uma tecnologia que tem a capacidade de carregar e descarregar totalmente com tempos de resposta na ordem dos microssegundos [12].

Os volantes de inércia, dadas as suas características, são propícios a aplicações em que haja a necessidade de uma rápida absorção ou geração de potência, equilibrando o sistema [11]. Embora tenha uma boa densidade energética, devido à sua natureza mecânica, as durações de descarga não são superiores a uma hora.

O seu período de vida útil ronda os 20 anos [13] e a sua eficiência não é afetada durante o mesmo, situando-se entre 85% e 95% [11][12]. Embora não apresente perda de capacidade de potência ou energia ao longo do seu tempo de serviço, os volantes de inércia apresentam perdas por dissipação de energia devido ao atrito mecânico, na ordem dos 2% da sua capacidade de energia quando em standby durante um mês [10]. Os custos de manutenção são reduzidos, sendo estimado entre 10-20 €/kW-ano [14]. Em termos de potência, os custos de investimento são elevados, rondam os 200-458 €/kW-instalado [11][15], por sua vez o custo de investimento de energia situa-se entre os 1.200-25.000 €/kWh-instalado [15].

2.3 - Baterias

As baterias têm um princípio de funcionamento baseado em fenómenos químicos. Existem diversos tipos de tecnologia baseados em baterias, cada uma com as suas propriedades. As baterias são constituídas por conjuntos de células eletroquímicas, agrupadas com o intuito de possuírem as características de tensão e corrente pretendidas. Tendo por base o seu princípio de funcionamento, estas podem ser denominadas em sistemas de baterias convencionais ou de fluxo regenerativo.

2.3.1 - Sistemas de Baterias Convencionais

As células eletroquímicas são os constituintes das baterias convencionais, sendo cada bateria constituída por duas ou mais células. Cada célula é composta por um contentor, um eletrodo positivo (ânodo), um eletrodo negativo (cátodo) e um eletrólito. Este encontra-se em contato com os dois eletrodos, sendo que a criação da corrente elétrica resulta do processo de oxidação-redução entre o eletrólito e os eletrodos [6]. Os iões libertados do processo anterior percorrem o eletrólito criando uma corrente contínua de baixa tensão [16]. Durante a descarga, os iões positivos fluem do ânodo para o cátodo através do eletrólito, o que leva os eletrões a fluir pelo circuito externo da bateria criando uma diferença de potencial nos seus terminais. Durante a carga, o processo é revertido pela aplicação de corrente no cátodo levando os iões negativos ao ânodo através do eletrólito (ver **Figura 2.2**).

Existem diversas categorias de baterias convencionais, tendo em conta os materiais utilizados, podendo ser divididas em quatro categorias, onde se destacam: as baterias de ácido-chumbo (PbA), de níquel (Ni), de sódio-enxofre (NaS) e de lítio (Li), dado que apresentam um estado apropriado de desenvolvimento, além de que estão disponíveis comercialmente [17].

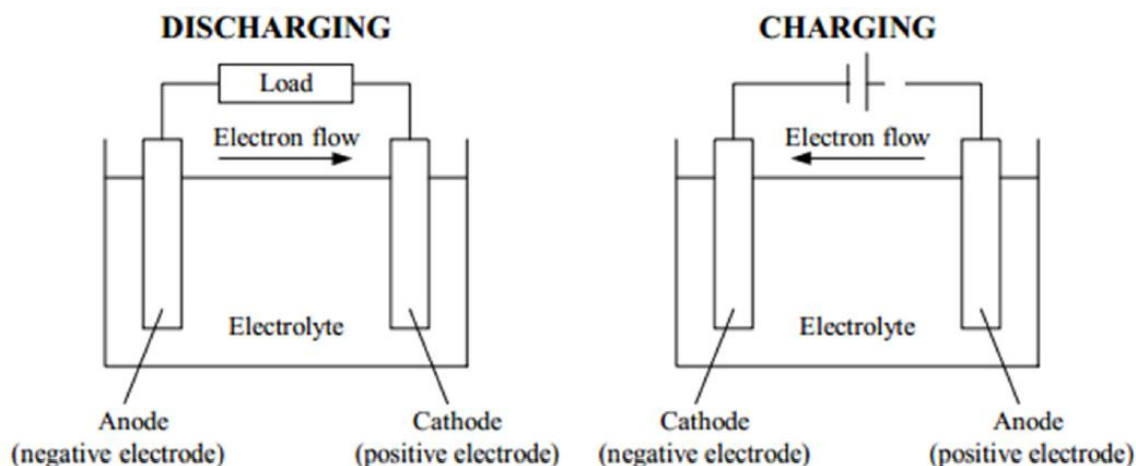


Figura 2.2 - Processo de carga e descarga de uma bateria convencional [18]

i. Baterias de ácido-chumbo

As baterias de ácido-chumbo apresentam uma solução tecnológica madura. Os seus elétrodos são construídos em chumbo, imersos numa solução aquosa de ácido sulfúrico, de onde provém a sua designação.

As baterias de ácido-chumbo oferecem flexibilidade nas suas capacidades de potência e energia, dado que estas dependem do tamanho e geometria dos elétrodos. No entanto, não se trata de uma flexibilidade total, dado que a capacidade de potência e energia não são características independentes.

O tempo de vida útil das baterias de ácido-chumbo varia entre os 10 e os 15 anos, sendo muito dependente do número de ciclos a que sejam sujeitas. Estimando-se que, durante este tempo, esta tecnologia perca cerca de 20% a 40% da sua capacidade inicial de potência e energia. A sua eficiência (entre 65-85% [19][20]) não sofre alterações durante o seu período de vida útil. Contudo, ocorre auto-descarga na base de 1% da sua capacidade de energia por mês, em standby [21]. Os custos de investimento de potência rondam os 200-305 €/kW-instalado [22][15], para a energia situam-se nos 305-330 €/kWh-instalado [15].

O tempo de resposta desta tecnologia é na ordem dos milissegundos, o que permite a aplicação destes sistemas quer em potência quer em energia. A duração de descarga pode variar entre 1 hora e 10 horas [10]. No entanto, o facto de possuir uma capacidade cíclica reduzida (entre 300-2.000 ciclos [16][15]) torna a sua aplicabilidade muito pouco interessante, quando é necessária a sua utilização frequente. A capacidade cíclica desta tecnologia é muito influenciada pela profundidade das descargas, podendo variar de fabricante para fabricante. Segundo [10], esta tecnologia pode fazer 10.000 ciclos com profundidade de descargas de 10%.

ii. Baterias de Níquel

As baterias de níquel são assim designadas por terem nas suas células o elétrodo positivo em compostos de níquel. Existem seis tipos de baterias de níquel: as de níquel cádmio, as de cloreto de níquel-sódio, as de hidretos metálicos de níquel, as níquel-hidrogénio, as de níquel-ferro e de níquel-zinco [10]. As duas primeiras são as mais comuns e com aplicações em redes elétricas de energia [17].

8 Sistemas de Armazenamento de Energia

Os sistemas de baterias de níquel podem ser adotados em aplicações de potência ou aplicações de energia. Sendo que, para aplicações de potência a variante mais adequada é a de níquel-cádmio, por sua vez a de cloreto de níquel-sódio é indicada para aplicações de energia. Ambas possuem tempos de resposta curtos, na ordem dos milissegundos.

A capacidade cíclica (cerca de 750-3.500 ciclos [23][10]) desta tecnologia, tal como a anterior, é muito influenciada pela profundidade das descargas, pelo que o seu tempo de vida útil (10-15 anos) pode ser determinado pela frequência de ciclos que o sistema seja sujeito. Segundo [10], as baterias de níquel são capazes de fazer 50.000 ciclos para uma profundidade de descarga de 10%.

Os avanços desta tecnologia são notórios, atualmente é cada vez menos frequente sofrerem do efeito de memória, isto é, as baterias perdiam capacidade caso não fossem totalmente descarregadas antes de voltarem a ser carregadas. Além disso, estima-se que a perda de capacidade durante o seu período de vida útil seja de 20% [23].

Estes sistemas de baterias possuem uma eficiência entre 65-85% [10]. O custo de investimento de potência é elevado, na ordem dos 458 €/kW-instalado [18], enquanto em termos de energia situa-se na ordem dos 305 €/kWh-instalado [15]. De salientar que, esta tecnologia apresenta perdas por auto-descarga de cerca de 5% da sua capacidade por mês, em standby [10].

iii. Baterias de Sódio-Enxofre

As baterias de sódio-enxofre funcionam a altas temperaturas (250°C a 400°C), em que cada célula é constituída com o elétrodo positivo em enxofre fundido, o elétrodo negativo em sódio fundido e o eletrólito sólido de um composto de alumínio (beta alumina) que separa os dois eléttodos [20].

Esta tecnologia possui um período de vida útil estimado entre os 12-20 anos [10], durante este período apresenta também uma perda de capacidade inicial de potência e energia na ordem dos 10%. Segundo [24], os custos de manutenção destes sistemas estimam-se em 0,5%-ano do custo do investimento, que se encontra entre os 305-550 €/kW-instalado para a potência e 305-405 €/kWh-instalado para a energia [15][25].

Os sistemas de baterias de sódio-enxofre são mais adequadas para a utilização em aplicações em energia, com uma eficiência entre 75-90% [10]. A duração de descarga destes sistemas pode ir de uma às dez horas [24], possuindo um tempo de resposta reduzido, na ordem dos segundos e uma capacidade cíclica razoável (entre 2.500-4.500 ciclos [10][20]), que segundo [10], pode ser dobrada se a profundidade das descargas for de 90%.

iv. Baterias de Lítio

As baterias de lítio são compostas com um elétrodo positivo em lítio, um elétrodo negativo em carbono ou grafite, sendo o eletrólito uma solução aquosa de lítio ou um polímero de lítio. Em cada célula, a circulação dos iões lítio entre os eléttodos é que cria corrente e tensão. Existem diferentes variantes construtivas desta tecnologia, resultantes da aplicação de diferentes materiais que constituem os eléttodos e eletrólitos. Entre estas, destacam-se a bateria de lítio-polímero e de iões de lítio por estarem comercialmente disponíveis [23].

O período de vida útil desta tecnologia ronda os 15 anos, estando este dependente da frequência cíclica, durante este tempo existe a perda de cerca de 20% da capacidade inicial de potência e energia. Segundo [26], esta tecnologia é capaz de perfazer 100.000 ciclos com profundidade de descarga de 10%, possuindo uma auto-descarga de 2%-ano da sua capacidade energética. Relativamente a custos, o custo de investimento é cerca de 305-600 €/kW-instalado em potência, e cerca de 458-800 €/kWh-instalado em energia [15][6], por sua vez os custos de manutenção são estimados em 2%-ano do custo de investimento [26].

Os sistemas de baterias de lítio podem ser utilizadas quer em aplicações de potência, quer em energia, dado que apresentam um tempo de resposta, na ordem dos milissegundos, alta eficiência (85-95% [26][27]) e boa capacidade cíclica (3.000-10.000 [26][28]).

2.3.2 - Sistemas de Baterias de Fluxo Regenerativo

Os sistemas de baterias de fluxo regenerativo diferem das convencionais quer nos aspetos construtivos quer nos materiais utilizados. Em termos construtivos, têm as suas células agrupadas em formato de pilha e constituídas pelos elétrodos positivo e negativo, separados por uma membrana de troca de iões. No entanto, os eletrólitos encontram-se em tanques separados, sendo durante a carga e descarga bombeados para a pilha de células ocorrendo fenómenos de oxidação-redução através da membrana de troca de iões (ver Figura 2.3).

Estes sistemas disponíveis comercialmente e com projetos já implementados em sistemas elétricos de energia são os sistemas de baterias de vanádio e de brometo de zinco [17].

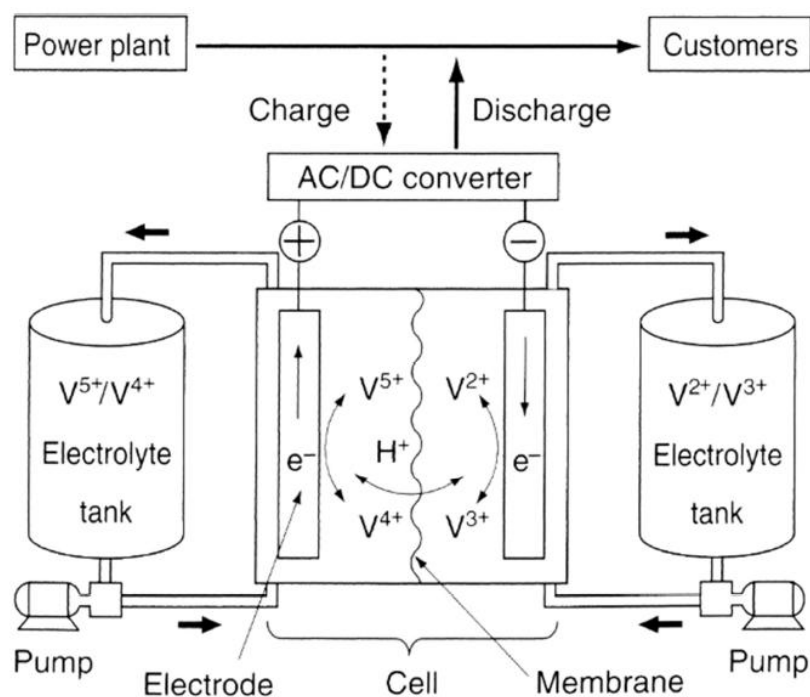


Figura 2.3 - Aspetos construtivos de um sistema de bateria de vanádio [10]

i. Baterias de brometo de zinco

Os eletrólitos dos sistemas de baterias de brometo de zinco são de uma solução aquosa de brometo de zinco, mas com diferentes concentrações de brometo. Durante a carga, o zinco solidifica e deposita-se no eletrodo negativo, acontecendo o mesmo ao brometo mas no eletrodo positivo. Existe um fluxo igual de iões de zinco e brometo entre os elétrodos,

assegurado pela membrana separadora. Na descarga, acontece o processo contrário, havendo a dissolução do zinco e do brometo.

Esta tecnologia possui um período de vida útil elevado, na ordem dos 20 anos, podendo ser alargado, através da substituição dos eletrólitos, no entanto fica mais dependente do número de ciclos que o sistema realiza. Também por esta razão, estes sistemas não apresentam perda de capacidade de potência e energia ao longo da sua vida útil, podendo, inclusive, ser aumentada durante esse período.

A eficiência (entre 65-80% [10][6]) é condicionada pelos circuitos de bombagem dos eletrólitos, podendo esta ser afetada se o sistema não for sujeito a uma correta manutenção. A auto-descarga é elevada, na ordem de 1%-hora da sua capacidade energética. A capacidade de energia desta tecnologia é dependente do tamanho das células, mas também da capacidade dos reservatórios dos eletrólitos. Pelas suas características, estes sistemas estão habilitados a aplicações em energia, com duração de descarga de duas a seis horas [6]. Possuindo tempos de resposta rápidos, na ordem dos milissegundos [10]. O custo de investimento nesta tecnologia ronda os 305 €/kW-instalado para a potência e 305-500 €/kWh-instalado para a energia [15].

ii. Baterias de Vanádio

Os sistemas de baterias de vanádio utilizam apenas o vanádio numa solução de ácido sulfúrico como eletrólito. O facto deste químico possuir quatro formas iónicas permite, através da membrana de iões, o fluxo de cargas iónicas para o circuito eléctrico ser completo (ver **Figura 2.3**) [10]. O seu princípio de funcionamento em carga e descarga é semelhante às baterias de brometo de zinco, mas com o processo a recorrer às formas iónicas do vanádio.

O tempo de vida útil desta tecnologia é superior a 20 anos [10], dado que o vanádio pode ser renovado, não se registando qualquer perda de capacidade durante este período. A capacidade de ser renovado e por utilizar apenas um eletrólito garante uma capacidade cíclica elevada (10.000-14.000 ciclos [20][26]) à tecnologia. Além disso, o tempo de resposta destes sistemas é na ordem dos milissegundos [10].

Nesta tecnologia, a capacidade de potência e a capacidade de energia são independentes. A capacidade de potência depende do tamanho das células, enquanto a capacidade energética está dependente do tamanho do reservatório do eletrólito. No entanto, esta tecnologia é utilizada mais frequentemente em aplicações em energia, sendo tendencialmente utilizada para durações de descarga de duas a dez horas [6]. Estes sistemas apresentam uma eficiência elevada (75-85% [10][6]) e um custo de investimento na ordem dos 305 €/kW-instalado para potência e 458 €/kWh-instalado para energia [15].

2.4 - Supercondensadores

O supercondensador, do ponto de vista tecnológico, é um dispositivo eletroquímico que é construído de forma semelhante às baterias: possuem dois eléctrodos porosos imersos numa solução de eletrólito, que flui para dentro e em torno das placas dos eléctrodos porosos. Os eléctrodos são feitos de carbono e o eletrólito é constituído, tipicamente, de hidróxido de potássio ou ácido sulfúrico [1]. Ao utilizar uma solução líquida como eletrólito e materiais porosos nos eléctrodos, a área de superfície eficaz aumenta radicalmente quando comparado

com os condensadores convencionais, o que provoca uma capacidade muito alta, e daí a sua designação.

Existem diferentes tipos de supercondensadores, embora todos tenham o mesmo princípio de funcionamento e desenho base. Cada tipo de supercondensador distingue-se pelo material e solução utilizada como eléctrodo e eletrólito, o que lhe confere um desempenho distinto [10].

Dentro das variantes comercialmente disponíveis destacam-se o supercondensador simétrico e o assimétrico [29]. O simétrico caracteriza-se pelo facto dos seus eléctrodos serem feitos do mesmo tipo de material, normalmente carbono, podendo o eletrólito ser aquoso ou orgânico. Na variante assimétrica, os eléctrodos são feitos de materiais diferentes (um de carbono e outro de metal), em que um deles possui uma capacidade elétrica muito superior ao outro, sendo o eletrólito aquoso [12].

Os supercondensadores possuem densidades energéticas muito reduzidas, mas densidades de potência muito elevadas [29][30], sendo por isso uma tecnologia propícia a aplicações em potência, em que haja necessidade de uma disponibilidade de potência durante períodos muito reduzidos, visto que a duração de descarga desta tecnologia não ultrapassa as dezenas de segundos [31]. Contudo, os supercondensadores apresentam-se capazes de carregar e descarregar totalmente com tempos de resposta muito reduzidos, na ordem dos microssegundos [29]. A sua capacidade cíclica é elevadíssima (100.000-500.000 ciclos [29][30]), não sendo afetada nem pela profundidade das descargas nem pelo estado de carga médio.

O período de vida útil dos supercondensadores é superior a 20 anos [10], não apresentando perda de capacidade de potência ou energia durante esse período. A sua eficiência (85-98% [12][29]) é elevada, não sofrendo alterações pelas condições de operação da tecnologia. O impacto ambiental que esta tecnologia pode provocar está dependente dos materiais utilizados na sua construção, havendo necessidade de reciclagem de alguns no fim da sua vida útil [12]. Relativamente a custos, a manutenção é estimada em 2% a cada ano do custo de investimento [10], que por sua vez ronda os 50-380 €/kW-instalado para potência e 7.600-20.000 €/kWh-instalado [15][29].

2.5 - Conclusões

Os sistemas de armazenamento de energia são importantes para a melhoria da estabilidade dos sistemas elétricos, nomeadamente ao nível da melhoria da estabilidade de frequência, sejam eles de grande dimensão ou isolados.

A secção 2.1 apresenta a importância da frequência se manter dentro dos limites técnicos estabelecidos, bem como a contribuição dos sistemas de armazenamento de energia para esse facto.

Nas secções 2.2, 2.3 e 2.4 são caracterizados alguns dispositivos de armazenamento de energia, nomeadamente, os volantes de inércia, baterias e supercondensadores, respetivamente. Cada tecnologia possui o seu próprio modo de funcionamento, envolvendo materiais e processos diversificados. Estes aspetos definem as características típicas de cada tecnologia, assim como as potencialidades e restrições de aplicação, por isso ao longo destas secções procurou-se quantificar os seguintes aspetos, transversais a todas as tecnologias como forma de as poder comparar: eficiência, período de vida útil do dispositivo, capacidade

12 Sistemas de Armazenamento de Energia

cíclica, modo de funcionamento, tempo de resposta e, por último, custos de manutenção e de investimento.

Uma vez identificadas e caracterizadas as tecnologias de armazenamento de energia, procede-se no Capítulo 3 à identificação e descrição da metodologia utilizada para resolver o problema proposto, nomeadamente encontrar o dimensionamento ótimo de sistemas de armazenamento de energia, como forma de garantir a estabilidade de frequência face às perturbações na produção renovável.

Capítulo 3

Metodologia Implementada

3.1 - Descrição do Problema Técnico a Resolver

O dimensionamento de um sistema de armazenamento de energia, que efetue o controlo primário da frequência com resposta rápida, a instalar numa rede isolada com elevada integração de produção renovável, tem como objetivo garantir a segurança do sistema. Para isso, o dimensionamento deve incluir o valor mínimo da energia capaz de armazenar, o valor nominal da potência ativa capaz de produzir/consumir, mas também lidar com os valores dos parâmetros de controlo do sistema, como a banda morta de frequência, necessária para evitar a atuação do dispositivo para desvios de frequência não significativos, e o estatismo, que define a sensibilidade do sistema para realizar ações de regulador primário de frequência.

O dimensionamento ótimo é obtido recorrendo à plataforma de simulação *Simulink*[®], que se encontra disponível no *MatLab*[®], onde se realizam diversas simulações com o objetivo de encontrar a melhor solução do ponto de vista económico. Estas simulações visam analisar a resposta do sistema face à ocorrência de determinadas perturbações. Estas consistem em variações, intempestivas ou frequentes, da produção eólica e/ou fotovoltaica. O modelo utilizado para analisar o sistema é simplificado, ou seja, de barramento único, e envolve a modelização dos sistemas de regulação de frequência e potência ativa.

3.1.1 - Problema de Segurança em Análise

Antes de se dimensionar o sistema de armazenamento de energia torna-se fundamental definir os critérios de segurança que serão utilizados para avaliar se o sistema é seguro ou não. Como o SEE em estudo se trata de uma rede isolada, os limites para o desvio de frequência são mais alargados do que numa rede interligada. Isto porque quanto menor é a inércia do sistema, maior é o desvio de frequência quando há um desequilíbrio entre a potência mecânica e a potência elétrica dos geradores convencionais, pelo que fica mais difícil manter o valor da frequência igual ao seu valor nominal. Por isso, considerou-se que o valor máximo recomendado para o desvio de frequência em regime transitório (após a perturbação) é de 1,5 Hz. Supôs-se assim que se a queda de frequência ultrapassar este valor, ocorre deslastre automático de carga, situação que se pretende evitar.

O limite enunciado no parágrafo anterior aplica-se quando se está perante uma perturbação muito severa, como por exemplo a saída de serviço de toda a produção renovável intempestivamente. Quando se tratam de perturbações menos severas, como por exemplo, pequenas variações de na produção eólica e/ou fotovoltaica, que se podem prolongar por alguns minutos, consideram-se limites mais rígidos para o desvio de frequência em relação ao valor nominal. Assim, considera-se que o desvio de frequência não deve sistematicamente violar os limiares definidos por $\pm 0,5$ Hz. Para este tipo de perturbação é desprezável do ponto de vista de segurança que estes limites sejam violados nos primeiros segundos após a ocorrência da perturbação. Dessa forma, definiu-se um período de tempo inicial durante o qual os limites de segurança são ignorados. O valor máximo recomendado para este período é de 50 segundos.

Na análise feita subtraiu-se 0,2 Hz aos valores indicados como máximos para o desvio da frequência. Assim, em vez de se considerar 1,5 e 0,5 Hz, passam a considerar-se 1,3 e 0,3 Hz. Este facto deve-se à consideração de uma margem de segurança devido aos seguintes aspetos [32]:

- Falhas de precisão de medida (10 mHz);
- Insensibilidade dos reguladores (10 mHz);
- Desvio máximo de frequência antes da perturbação (50 mHz);
- Erros do modelo de simulação dinâmica (130 mHz).

De referir que os limites definidos nesta subsecção são apenas valores típicos recomendados. A aplicação permite que seja o utilizador a decidir quais as condições de segurança do sistema que pretende simular.

3.1.2 - Caraterísticas do Sistema de Armazenamento a Dimensionar

O sistema de armazenamento a dimensionar pode ser modelizado como uma fonte de tensão DC constante, utilizando a eletrónica de potência como interface entre o dispositivo e a rede (AC/DC/AC no caso dos volantes de inércia).

Supondo que o dispositivo de armazenamento tem energia suficiente para manter o valor da tensão DC constante durante o intervalo de tempo em que está a contribuir com a potência para a rede, não é necessário considerar o modelo dinâmico daquele sistema, chegando portanto considerar o modelo em regime estacionário [1].

O modelo utilizado para caraterizar o dispositivo de armazenamento de energia nas simulações é o modelo VSI ("*Voltage Source Inverter*") considerado em [1]. Apesar deste modelo englobar a regulação de tensão e frequência, apenas irá ser focada a parte da regulação de frequência.

O VSI age como uma fonte de tensão que reage às perturbações da rede apenas baseado em informações disponíveis aos seus terminais. A equação que descreve o modelo VSI é a seguinte:

$$\omega = \omega_0 - K_p \cdot P \quad (3.1)$$

onde ω é o valor de saída da frequência, ω_0 é o valor de frequência para o qual a produção de potência ativa do dispositivo é nula, $1/K_p$ é o ganho *Active Power Droop* (ou estatismo) e P é a potência fornecida pelo dispositivo à rede.

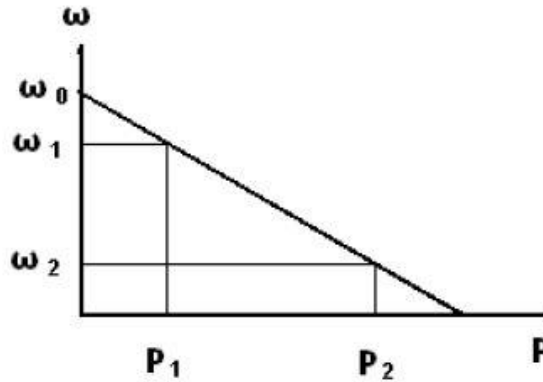


Figura 3.1 - Desvio da frequência em função da variação da potência ativa

Tendo em conta o modelo e a Figura 3.1, se o VSI operar numa rede isolada e se ocorrer um aumento de carga ΔP , aos terminais do VSI, o desvio de frequência aos seus terminais é:

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \omega_0 - K_p \cdot (P_1 + \Delta P) - (\omega_0 - K_p \cdot P_1) \Rightarrow \Delta\omega = -K_p \cdot \Delta P \quad (3.2)$$

Se, no momento em que se dá aquela variação, o dispositivo não estiver nem a receber nem a fornecer potência à rede ($P_2=0$), a potência que aquele passa a fornecer é dada pela expressão:

$$\Delta P = P \Rightarrow \Delta\omega = -K_p \cdot P \Rightarrow P = -1/K_p \cdot \Delta\omega \quad (3.3)$$

O modelo dinâmico do dispositivo de armazenamento de energia tem os seguintes parâmetros:

- **T (s):** Constante de tempo do dispositivo de armazenamento de nome *active power decoupling*, que tem como objetivo modelizar os atrasos da eletrónica de potência e de medição. Não tem impacto no comportamento dinâmico do dispositivo, porque os seus valores típicos são muito pequenos;
- **FDB (Hz):** Banda morta de frequência do sistema de armazenamento de energia, necessária para evitar a atuação do dispositivo para desvios de frequência não significativos;
- **R (Hz/MW):** Representa o estatismo, que define a sensibilidade do sistema de armazenamento de energia para realizar ações de regulador primário de frequência;
- **Pmax/Pmin (MW):** Limites máximos e mínimos de potência ativa do dispositivo;
- **E (MWs):** Capacidade de armazenamento de energia do sistema.

Assim, o diagrama de blocos que representa o dispositivo de armazenamento é o que se apresenta na seguinte figura:

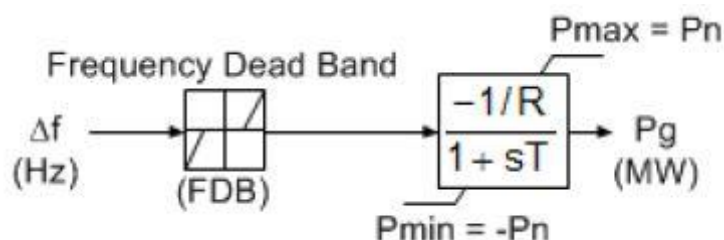


Figura 3.2 - Diagrama de blocos do dispositivo de armazenamento de energia [33]

De referir que supôs-se que no início das simulações o sistema de armazenamento de energia encontra-se totalmente carregado, não sendo capaz de consumir nestas condições. Por outro lado, se o sistema ficar vazio, não é capaz de fornecer energia à rede.

3.1.3 - Pressupostos do Estudo

Ao longo da realização do trabalho foram considerados um conjunto de pressupostos que, apesar de estarem implícitos em diferentes partes deste relatório, são importantes de referir.

Num problema de dimensionamento, geralmente, considera-se o pior caso, daí que basta dimensionar o sistema de armazenamento para as condições de operação mais severas, pois se consegue garantir segurança de operação para essas condições, então também será capaz de funcionar corretamente para condições menos severas.

O dimensionamento de um sistema de armazenamento de energia é efetuado no sentido de minimizar as suas características de potência e energia que garantem a segurança de operação do sistema. Como são estas características que ditam o custo de investimento do sistema, esta estratégia tem como objetivo minimizá-lo.

Em termos de escolha da solução final, poderá ser adotada uma capacidade de armazenamento de energia superior à ótima encontrada, sem que isso altere a resposta do sistema e coloque em causa a sua segurança. Já em relação à potência, torna-se perigoso adotar a mesma medida, pois alteraria significativamente a resposta do sistema, não podendo à partida garantir a sua segurança. Isto porque o sistema gasta mais rapidamente a energia armazenada e, como consequência, pode perder ação de controlo antes de terminar a perturbação.

O método, apresentado neste capítulo, pode ser aplicado supondo um tipo de perturbação (severa ou frequente) ou a combinação dos dois tipos de perturbação. A ocorrência de diferentes tipos de perturbação provoca diferentes exigências ao sistema de armazenamento de energia, daí o seu interesse.

3.2 - Método de Otimização

O método de otimização utilizado para a resolução do problema proposto, como já foi referido anteriormente, foi o EPSO, que em português significa Enxames Evolucionários. Este surge através da implementação das teorias evolucionárias ao método de otimização *Particle Swarm Optimization* (PSO), este método que em português significa enxame de partículas, deve-se à iniciativa de James Kennedy e Russel Eberhart [34] e veio a mostrar-se competitivo

relativamente a outras meta-heurísticas. O PSO trabalha com um conjunto de soluções de um problema a otimizar, designadas como partículas, que evoluem no espaço das alternativas.

Segundo [35], estas partículas movem-se segundo a influência de três vetores aos quais se dá o nome de inércia, memória e cooperação. O primeiro vetor impele a partícula numa direção igual à que ela vinha seguindo, o segundo atrai a partícula na direção da melhor posição até ao momento ocupada para essa partícula e, por último, o terceiro atrai a partícula na direção do melhor ponto do espaço até ao momento descoberto pelo enxame (ver Figura 3.3).

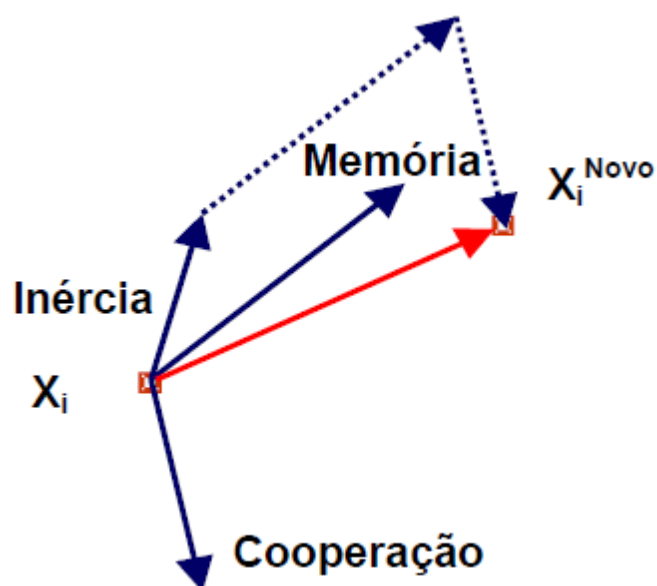


Figura 3.3 - Ilustração do movimento de uma partícula X_i [33]

O EPSO nasce da ideia de auto-adaptação e evolução, que já havia sido testado com sucesso nos algoritmos evolucionários, mantendo os princípios enunciados do PSO. Com esta ideia, o processo auto-adaptativo pode focar mais ou menos a orientação de um enxame e permite que este continue a ser "agitado" mesmo quando as partículas já convergiram todas para a mesma região do espaço e se acham muito próximas, este facto permite que a solução não fique presa nos mínimos/máximos locais. O EPSO nunca garante que a solução ótima seja encontrada e, normalmente, quando se corre o método outra vez a solução será diferente, no entanto diz-se que um algoritmo é robusto quando é corrido várias vezes e dá sempre um bom resultado com pequenos desvios da solução apresentada. Isto porque, numa aplicação real, não se espera que o algoritmo seja corrido cem ou mil vezes sobre o mesmo problema, espera-se efetuar apenas uma corrida e confiar no resultado.

O EPSO, tal como qualquer outro problema moldado por algoritmos evolucionários, para atender às restrições adota uma estratégia de penalidades sempre que alguma restrição fica violada, ou então limita o movimento que as partículas podem fazer no espaço, garantindo à partida que nenhuma dessas restrições seja ultrapassada. Seguindo a primeira estratégia, os indivíduos com mau valor de adaptação (por efeito de penalidades) tendem a ser eliminados da população e, portanto, a tendência para a satisfação das restrições sai reforçada.

3.3 - Função Objetivo e Restrições

Na aplicação de um sistema de armazenamento de energia para evitar problemas de estabilidade da frequência numa rede isolada, a função objetivo desenvolvida para a definição do dimensionamento ótimo do dispositivo a instalar é representada, matematicamente, pela equação:

$$\min\{Custo_P \cdot S_b \cdot P_n + Custo_E \cdot E\} \text{ [€]} \quad (3.4)$$

onde $Custo_P$ representa o custo de investimento associado à potência do dispositivo de armazenamento de energia, sendo expresso em euros por Megawatt (€/MW), P_n representa a potência nominal no sistema por unidade (em p.u. na base do sistema), S_b é a potência de base do sistema em Mega Volt-Âmpere (MVA), $Custo_E$ é o custo de investimento associado à capacidade de armazenamento de energia do dispositivo, sendo expresso em euros por Megawatt-segundo (€/MWs) e, por último, E representa a capacidade de armazenamento de energia do dispositivo, em Megawatt-segundo (MWs). Como os dispositivos de armazenamento de energia são, normalmente, adquiridos com a quantidade de potência nominal e capacidade de armazenamento de forma separada, a função objetivo passa então por minimizar o custo de investimento inicial do dispositivo a instalar. Tal como pode ser visto nas secções 2.2, 2.3 e 2.4, o custo de investimento quer de potência quer de energia variam de tecnologia para tecnologia, não havendo em muitos casos um preço único, mas sim um intervalo de valores em que o preço se situa. Para modelizar corretamente o custo de investimento total do dispositivo de armazenamento de energia, a função objetivo deveria considerar todos os custos associados durante o seu período de vida útil, no entanto tal facto apenas serviria para comparar o custo entre tecnologias diferentes, como não é objetivo do trabalho, tal não foi considerado.

A equação 3.4 esta sujeita às seguintes restrições:

$$D_{fmin,1} \leq D_f \leq D_{fmax,1} \quad (3.5)$$

$$D_{fmin,2} \leq D_f \leq D_{fmax,2}, \text{ se } t_{sim} > t_{max} \quad (3.6)$$

$$BM_{min} \leq BM \leq BM_{max} \quad (3.7)$$

$$R_{dfmin} \leq R_{df} \leq R_{dfmax} \quad (3.8)$$

$$E_{min} \leq E \leq E_{max} \quad (3.9)$$

$$P_n \in \{P_1, P_2, \dots, P_k\} \quad (3.10)$$

onde D_f representa o desvio de frequência atingido em regime transitório pela rede isolada na sequência da ocorrência da perturbação em análise, sendo expresso em Hertz (Hz) e obtido através da simulação dinâmica, t_{sim} representa o tempo da simulação dinâmica, em segundos (s), t_{max} representa o tempo durante o qual os limites de segurança da perturbação do tipo frequente são ignorados, expresso em segundos (s), BM representa a banda morta de frequência do sistema de armazenamento de energia, necessária para evitar a atuação do dispositivo para desvios de frequência não significativos, sendo expressa em Hertz (Hz), E representa a capacidade de armazenamento de energia do dispositivo, em Megawatt-segundo (MWs), R_{df} representa o desvio de frequência permitido pela definição do valor do estatismo R ($R=R_{df}/P_n$) definindo assim a sensibilidade do sistema de armazenamento de energia para

realizar ações de regulador primário de frequência (R_{df} expresso em Hz) e, por último, P_n representa a potência nominal do sistema em Megawatt (MW). De referir que na aplicação desenvolvida a violação das restrições 3.5 e 3.6 implica a penalização da função objetivo, enquanto que para as outras restrições adotou-se a estratégia de limitar o movimento que as partículas podem fazer no espaço, garantindo à partida que nenhuma seja violada.

Como se pode verificar através da restrição 3.10, a potência nominal é uma variável discreta, tipicamente com valores inteiros, pelo que como o EPSO acomoda preferencialmente variáveis contínuas, adotou-se uma estratégia de aproximação, que se caracteriza da seguinte maneira: se uma variável deve ser inteira e assume um valor real não inteiro, ela é arredondada para o inteiro mais próximo.

Os dispositivos de armazenamento de energia disponíveis no mercado possuem um valor, normalmente, inteiro de potência nominal e de capacidade de armazenamento de energia. No entanto, a capacidade de armazenamento pode tomar valores contínuos na função objetivo, dado que esta característica pode ser sobredimensionada sem que isso traga consequências negativas para a resposta do sistema, tal como já foi referido. Dessa forma o valor ótimo da capacidade de armazenamento será o valor mínimo que garante as condições de segurança da rede. Quanto à potência nominal, o mesmo não pode ser aplicado. O sobredimensionamento desta variável provoca alterações na resposta do sistema, não podendo garantir a sua segurança, e daí a necessidade de utilizar valores discretos.

Tal como foi referido anteriormente, para uma perturbação frequente é desprezável do ponto de vista de segurança que os seus limites sejam violados nos primeiros segundos após a ocorrência da perturbação. Dessa forma, para este tipo de perturbação definiu-se um período de tempo desde o início da simulação dinâmica (t_{max}), durante o qual os limites de segurança podem ser violados (ver restrição 3.6).

No caso de serem estudadas mais do uma perturbação, será considerada uma restrição do tipo da 3.5 para a perturbação severa e a restrição 3.6 para a perturbação do tipo frequente, utilizando limites diferentes.

3.4 - Conclusões

Ao longo deste capítulo procurou-se descrever o problema técnico em análise, bem como o método de otimização, a função objetivo e as suas restrições, utilizados para resolver o problema proposto.

A secção 3.1 descreve o problema técnico a resolver, nomeadamente, as condições de segurança do sistema, o modelo dinâmico do dispositivo de armazenamento de energia, bem como os pressupostos considerados ao longo do estudo.

Na secção 3.2 caracterizou-se o EPSO, método de otimização utilizado, enunciando o seu princípio de funcionamento, assim como as suas particularidades. Tal como foi referido anteriormente, a orientadora forneceu uma ferramenta, em ambiente *MatLab*[®], com este método de otimização.

Na secção 3.3 enuncia-se a função objetivo e as respetivas restrições, utilizadas no método de otimização. Aqui procurou-se descrever o modelo matemático utilizado na aplicação desenvolvida, para encontrar o dimensionamento ótimo do sistema de armazenamento de energia a instalar na rede isolada.

De salientar que ao longo do desenvolvimento da aplicação em *MatLab*[®] procurou-se que esta fosse o mais geral possível e não apenas para resolver o caso de estudo apresentado no

Capítulo 4. Assim, a aplicação não serve exclusivamente para volantes de inércia, ao contrário do que o nome da dissertação transparece, mas também para outras tecnologias de armazenamento de energia.

Capítulo 4

Caso de Estudo

Em todas as redes, sejam elas isoladas ou de grande dimensão, é fundamental manter o valor da frequência dentro de certos limites, de maneira a que a qualidade de serviço em regime normal seja assegurada, bem como manter a segurança do sistema em caso de perturbação.

O objetivo deste capítulo consiste em encontrar o dimensionamento ótimo do sistema de armazenamento de energia, de acordo com o metodologia explicada no Capítulo 3, a instalar numa rede isolada, de características reais, com elevada integração de energias renováveis, nomeadamente eólica e solar. Este tipo de redes, devido ao facto de serem pouco robustas do ponto de vista de controlo de frequência, merece especial atenção, já que é mais difícil fazer com que a frequência se mantenha dentro da gama de valores estipulados no caso de ocorrer algum tipo de perturbação. Além disso, trata-se de uma rede onde a carga é maioritariamente alimentada pela produção renovável, eólica e fotovoltaica, sendo estas centrais dotadas de tecnologias convencionais. Esta situação agrava ainda mais a situação, já que estas duas são fontes de energia intermitentes, podendo mesmo a sua produção baixar drasticamente num curto espaço de tempo.

4.1 - Constituição do SEE

Como já foi referido, o Sistema Elétrico de Energia (SEE) em estudo possui características reais fornecidas pela orientadora. Sendo composto por uma central térmica Diesel com quatro grupos geradores, dois parques eólicos dotados de geradores assíncronos convencionais em gaiola de esquilo e dois parques fotovoltaicos do tipo convencional. Na **Tabela 4.1** apresentam-se as potências instaladas no sistema.

Tabela 4.1 - Potências instaladas da rede em estudo

Central Térmica		
Número de unidades	Potência por unidade (MVA)	Potência total instalada (MVA)
4	5,16	20,64
Parque Eólico 1		
Número de unidades	Potência por unidade (MW)	Potência total instalada (MW)
2	0,225	0,45
Parque Eólico 2		
Número de unidades	Potência por unidade (MW)	Potência total instalada (MW)
1	0,66	0,66
Parque Fotovoltaico 1		
Número de unidades	Potência por unidade (MW)	Potência total instalada (MW)
2	0,5	1
Parque Fotovoltaico 2		
Número de unidades	Potência por unidade (MW)	Potência total instalada (MW)
2	0,5	1
Potência não renovável total instalada (MVA)		20,64
Potência renovável total instalada (MW)		3,11

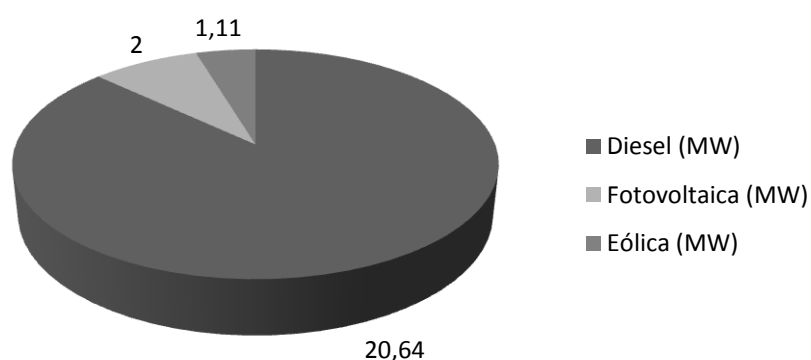


Figura 4.1 - Contribuição de cada tipo de produção para o potência total instalada

Devido à pequena dimensão da rede o comportamento dinâmico da frequência não é influenciado pela consideração no modelo dinâmico dos ramos da rede de transporte. Desta forma, estas ligações foram desprezadas no modelo dinâmico utilizado no corrente trabalho. No entanto, refira-se que cada parque eólico está ligado numa subestação diferente e que os parques fotovoltaicos estão ligados à mesma subestação.

Como já foi referido, o sistema em estudo dispõe de 4 geradores térmicos, cujas características se apresentam na tabela seguinte.

Tabela 4.2 - Características dos geradores que constituem a central térmica

Geradores Síncronos da Central Térmica	
Geradores	G1 a G4
Un (kV)	6,6
Sn (MVA)	5,16
Pmin (MW)	0,81
Pmax (MW)	4,32
H(s) (Sb=10MVA)	3,7874

4.2 - Despacho

O cenário de carga considerado para realização deste trabalho foi o cenário de Horas Cheias de Não Verão (HCNV). Isto porque é no Verão que a carga é máxima, pelo que há mais geradores térmicos em funcionamento o que faz com que a rede fique mais robusta e, portanto, menos sensível a perturbações que possam ocorrer. Nos cenários de Não Verão o valor da carga é menor, há menos geradores térmicos em funcionamento, a rede torna-se menos robusta e menos estável face a perturbações. O presente trabalho trata um problema de dimensionamento e, geralmente, neste tipo de problema considera-se o pior caso, daí ser o cenário mais indicado a considerar.

Foi efetuado o despacho considerando os valores reais da carga e perdas, previamente fornecidos pela orientadora, e que, tanto os parques eólicos como os fotovoltaicos, se encontram a produzir praticamente à sua capacidade máxima. Sendo assim, a produção fica distribuída da forma como se apresenta na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Valor da carga, perdas e produção

Cargas + perdas (MW)	4,62
Eólica (MW)	1
FV (MW)	2
Diesel (MW)	1,62

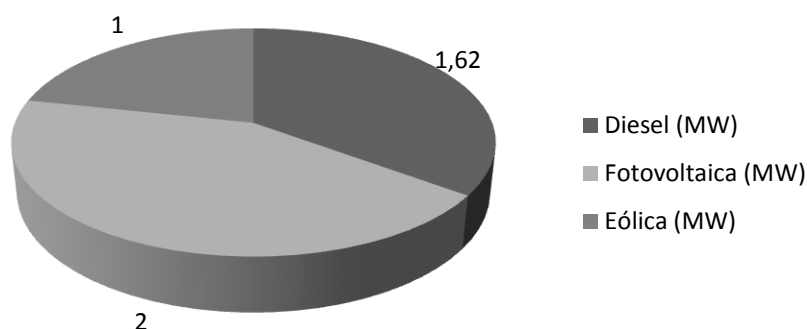


Figura 4.2 - Despacho para a produção térmica e renováveis

Assim, foram analisadas todas as soluções possíveis de pré-despacho para a produção térmica. As soluções consideradas válidas são aquelas que respeitam as restrições técnicas dos geradores e a garantia de existência de reserva girante (RG) suficiente. Estas restrições

são: a potência total produzida pela central Diesel tem que respeitar os limites técnicos dos geradores, isto é, a potência produzida por esta central deve ser superior à soma das potências mínimas dos geradores em serviço e inferior à soma das potências máximas dos geradores em serviço; a reserva girante do sistema tem que ser superior a um determinado valor, que neste caso são 2MW, correspondente a uma possível saída intempestiva da produção eólica e uma quebra de 50% da produção fotovoltaica, ou então à perda total da produção fotovoltaica. A **Tabela 4.4** contém todas as soluções possíveis para o pré-despacho. De salientar que em cada solução de pré-despacho, considerou-se uma igual distribuição de produção pelas máquinas convencionais em serviço.

Tabela 4.4 - Soluções possíveis para o pré-despacho da central térmica

ID	Nr de máquinas a funcionar	Cálculos			Condições que não podem ocorrer			Solução válida?	Dist Pg por máquina (MW)
		Pmin (MW)	Pmax (MW)	RG (MW)	Pmin>Diesel?	Pmax<Diesel?	RG<RGmin?		G1-G4
1	1	0,81	4,32	2,7	Não	Não	Não	Sim	1,62
2	2	1,62	8,64	7,02	Não	Não	Não	Sim	0,81
3	3	2,43	12,96	11,34	Sim	Não	Não	Não	0,54
4	4	3,24	17,28	15,66	Sim	Não	Não	Não	0,405

Como se pode verificar através dos valores que constam na **Tabela 4.4**, existem duas soluções que respeitam todas as restrições. A solução adotada corresponde a ter dois geradores térmicos em funcionamento, porque para além do sistema ficar com um elevado valor de reserva girante, aumenta a sua robustez, por não ficar refém de um único grupo gerador convencional.

4.3 - Regulador de Velocidade

Um SEE ideal seria aquele em que o valor da potência mecânica das máquinas convencionais igualasse sempre o valor da carga adicionado das perdas. No entanto, é apenas um cenário ideal, na realidade esta situação não acontece.

A frequência do sistema é dependente do balanço da potência ativa. Uma alteração do valor da carga ou da produção num ponto da rede reflete-se no sistema através de uma oscilação no valor da frequência. Por isso é necessário haver um regulador de velocidade em cada grupo gerador para poder fazer o controlo primário da frequência [36].

O controlo secundário é assegurado pelo AGC, *Automatic Generation Control*, que através de ajustes da produção dos geradores afetos, faz com que a frequência retorne ao valor nominal, mantendo as trocas de potência entre as áreas de controlo nos valores estipulados. O AGC tem também como objetivo distribuir a potência requerida, por exemplo um aumento de carga, pelas unidades de maneira a minimizar os custos [36].

Num sistema isolado, o AGC funciona de maneira diferente, já que nestes sistemas não há problema das trocas de potência nas interligações. Contudo, a função principal do AGC, trazer a frequência para o valor nominal, mantém-se. Isto é conseguido através do acrescento de um controlo integral que atua nos reguladores das unidades com controlo secundário da frequência. Este controlo integral mantém a frequência no valor nominal em regime

estacionário. Esta ação suplementar de controlo é muito inferior ao controlo primário de frequência e entra em funcionamento, aproximadamente, após concluído o controlo primário [36].

Assim, sempre que há um desequilíbrio entre a potência mecânica desenvolvida pela turbina da máquina e a produção solicitada pela rede, como o valor da frequência está relacionado com a velocidade de rotação das máquinas convencionais, este sofre desvios em relação ao valor nominal. Daí que seja necessário que a cada turbina esteja associado um regulador de velocidade que controle a potência mecânica da turbina, de modo a eliminar as oscilações do valor da frequência, e também fazer com que esta volte ao seu valor nominal após a ocorrência de qualquer tipo de perturbação na produção.

O regulador de velocidade utilizado neste caso de estudo foi um regulador típico com a configuração apresentada na **Figura 4.3**.

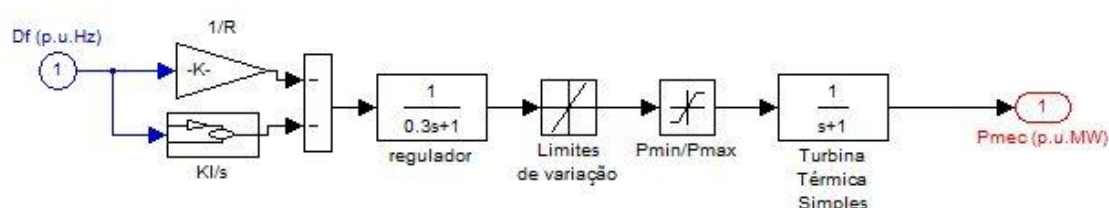


Figura 4.3 - Diagrama de blocos do regulador típico utilizado

Os valores dos parâmetros deste regulador de velocidade foram fornecidos pela orientadora e encontram-se na **Tabela 4.5**.

Tabela 4.5 - Valores considerados para os parâmetros do regulador de velocidade

Sistema de controlo de velocidade	
Parâmetro	Regulador de velocidade típico de uso comum
KI (p.u.MW/p.u.Hz) (Sb=10MVA)	0,1548
R (p.u.Hz/p.u.MW) (Sb=10MVA)	0,2
Constante de tempo do regulador (s)	0,3
Constante de tempo da turbina (s)	1

4.4 - Modelo Dinâmico Utilizado no *Simulink*[®]

Como foi referido anteriormente, para avaliar a resposta do sistema face a perturbações utilizou-se a plataforma de simulação *Simulink*[®] que o *MatLab*[®] disponibiliza. Para isso construiu-se o modelo simplificado do SEE, de barramento único, que envolve os sistemas de regulação de frequência. A utilização do modelo simplificado, de barramento único, é possível sem prejudicar os resultados, devido à pequena dimensão da rede. O modelo da rede apresenta-se na **Figura 4.4**.

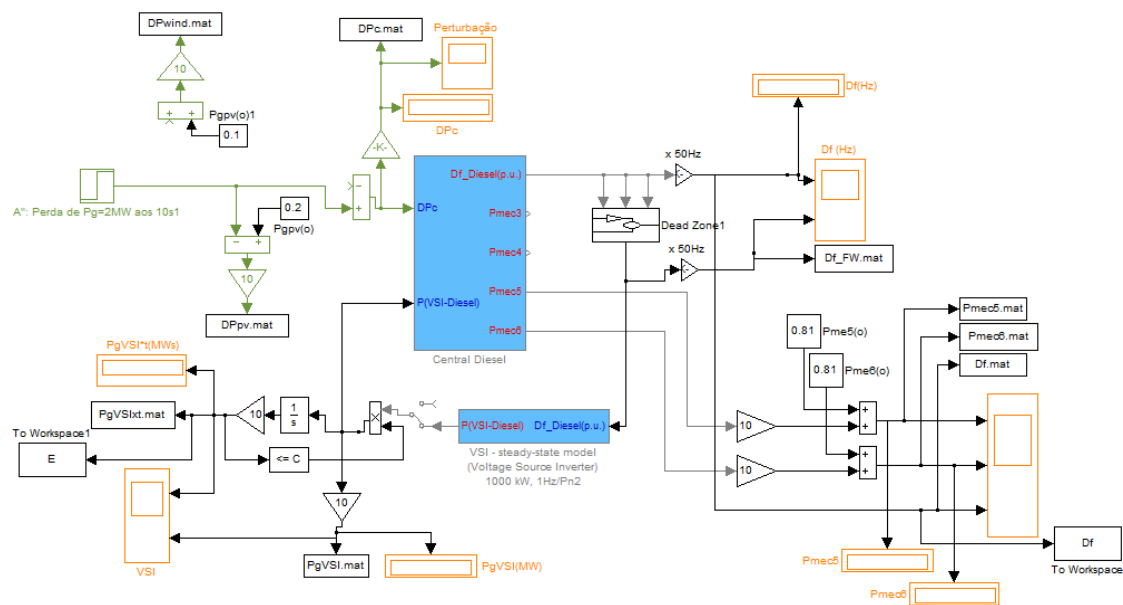


Figura 4.4 - Modelo utilizado no *Simulink*[®] para a representação da rede

Na Figura 4.4, o bloco designado "Central Diesel" caracteriza o sistema de regulação primária da frequência da central térmica. Este inclui a variação da produção dos geradores Diesel (P_{mec3} , P_{mec4} , P_{mec5} e P_{mec6}), o desvio de frequência da rede ($Df_Diesel(p.u.)$) face às perturbações, que neste caso são representadas por um aumento no consumo (DPc), devido à diminuição da produção renovável e devido à potência produzida pelo sistema de armazenamento ($P(VSI_Diesel)$). O modelo utilizado nas simulações que caracteriza o sistema de regulação primária da frequência da central térmica está representado na Figura 4.5.

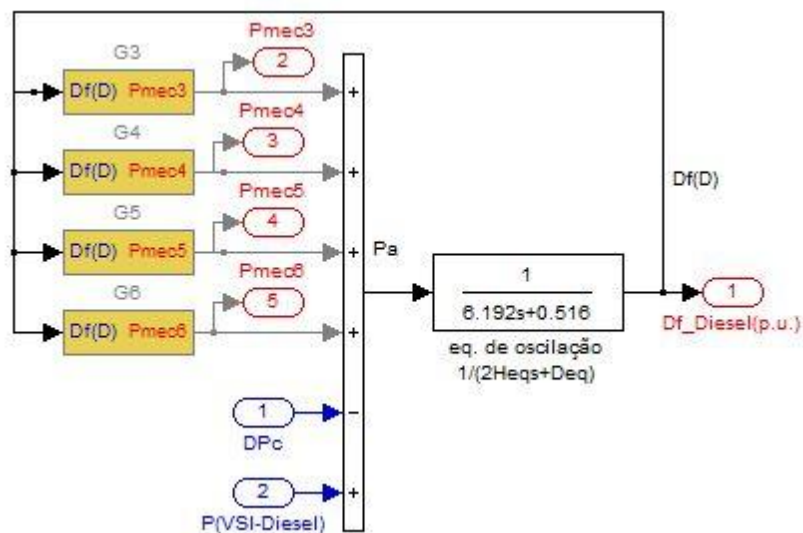


Figura 4.5 - Modelo contido no bloco correspondente ao sistema de regulação primária da frequência da central térmica

4.5 - Perturbações

Antes de apresentar os resultados do caso de estudo, é preciso compreender que a produção renovável está sujeita a variações devido à intermitência das fontes, nomeadamente, na eólica e fotovoltaica. Esta intermitência deve-se sobretudo, no caso da eólica, a alterações da velocidade do vento e, no caso da fotovoltaica, à movimentação das nuvens que impedem/permitem que a radiação solar seja recebida pelos painéis fotovoltaicos. Portanto, dado que a produção renovável assume aproximadamente 65% da produção total, é necessário estudar a resposta do sistema face a estas situações.

As perturbações consideradas para a realização das simulações foram fornecidas pela orientadora e encontram-se descritas na **Tabela 4.6**.

Tabela 4.6 - Descrição das perturbações consideradas nas simulações da resposta da rede isolada em estudo

Perturbação	Duração (s)	Variações na produção (descrição)		Variações na produção (MW)	
		Eólica	Fotovoltaica	Eólica	Fotovoltaica
1	240	-	Saída intempestiva	-	2
2	240	±20% durante 5 segundos, esperando 10	±50% durante 5 segundos, esperando 10	0,2	1
3	240	-	±50% durante 5 segundos, esperando 10	0	1

A perturbação 3, como se pode observar na **Tabela 4.6**, resulta de uma alteração da segunda perturbação, onde não se consideram variações na produção eólica. Inicialmente esta perturbação não era para ser considerada, no entanto acabou por se revelar pertinente, funcionando como termo de comparação com a perturbação 2, que se revela mais exigente do ponto de vista de segurança do sistema.

Os limites de segurança considerados foram os valores recomendados na secção 3.1.1.

4.5.1 - Perturbação 1 - Saída Intempestiva de Toda a Produção Fotovoltaica

De acordo com o despacho considerado, é a produção fotovoltaica que mais contribui para alimentar a carga. Por isso, torna-se importante analisar a resposta do sistema no caso de toda a produção fotovoltaica sair intempestivamente de serviço, como por exemplo, a ocorrência de um curto-circuito à saída da subestação a que estão ligados os dois parques fotovoltaicos. No caso de ocorrer este tipo de perturbação, a preocupação é respeitar os critérios de segurança para evitar o deslastre automático de carga, sendo por isso permitido comprometer por instantes a qualidade de serviço. Em seguida, apresenta-se na **Figura 4.6** a perturbação 1.

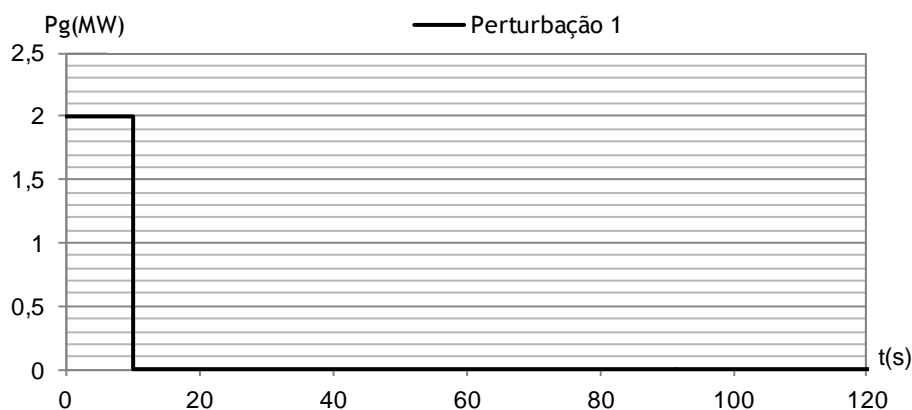


Figura 4.6 - Perturbação 1: Saída intempestiva de toda a produção fotovoltaica

Como já foi referido, apesar desta perturbação representar uma variação da produção fotovoltaica, na plataforma de simulação ela é caracterizada como um aumento de carga, o que para efeitos de desvio de frequência tem o mesmo resultado.

Como forma de avaliar a necessidade de instalar um sistema de armazenamento de energia na rede em estudo, procedeu-se à análise do desvio de frequência do sistema face à ocorrência da perturbação 1 sem instalação de um sistema de armazenamento de energia. A **Figura 4.7** representa a evolução temporal do desvio de frequência perante a referida perturbação, obtido pela plataforma de simulação dinâmica.

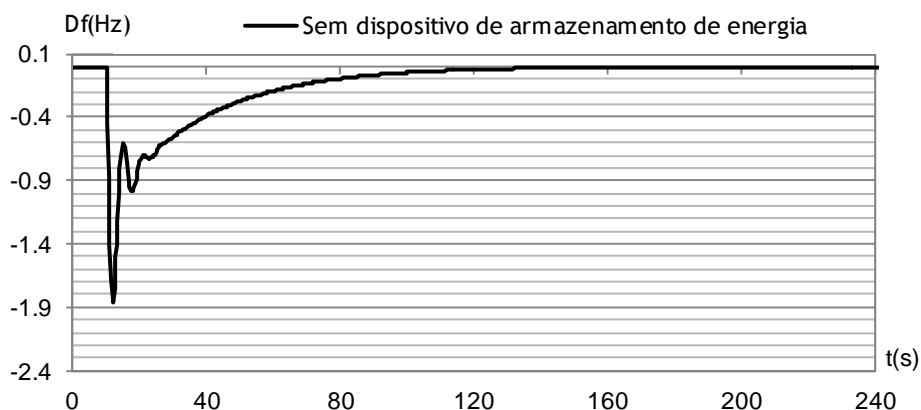


Figura 4.7 - Desvio de frequência do sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 1 sem instalação de um sistema de armazenamento de energia

Perante a **Figura 4.7** pode observar-se que o desvio de frequência sofrido facilmente ultrapassa o limite de 1,3 Hz, daí a necessidade de instalar um sistema de armazenamento de energia na rede em questão. Note-se que, neste cenário, existe reserva girante Diesel suficiente para compensar a perda de 2 MW, pelo que a perda de segurança em termos de frequência deve-se à pouca rapidez de resposta do controlo primário da frequência fornecido pelos grupos Diesel.

4.5.2 - Variações Intermitentes de Produção Renovável

De acordo com a descrição feita na **Tabela 4.6**, em seguida apresenta-se a representação gráfica das perturbações 2 e 3.

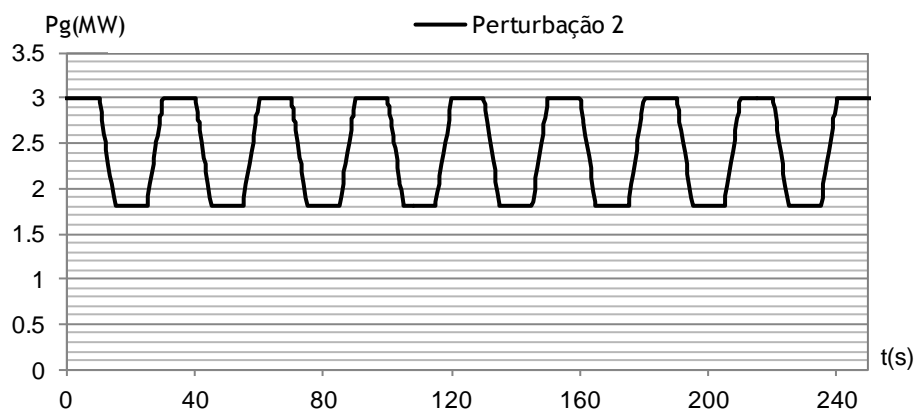


Figura 4.8 - Perturbação 2: Variação de 50% da produção fotovoltaica em conjunto com 20% de produção eólica durante 5 segundos mantendo-se estável durante 10 segundos de cada ciclo

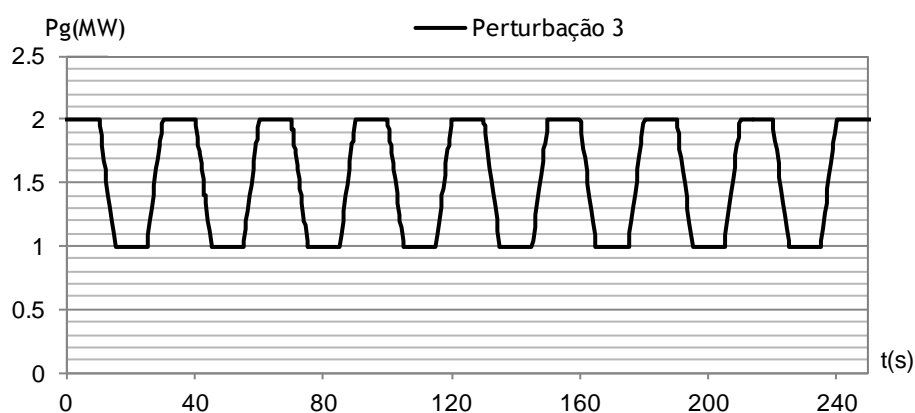


Figura 4.9 - Perturbação 3: Variação de 50% da produção fotovoltaica durante 5 segundos mantendo-se estável 10 segundos de cada ciclo

Seguidamente, apresenta-se a evolução do desvio de frequência da rede em estudo face às perturbações 2 e 3, considerando a inexistência de um sistema de armazenamento de energia.

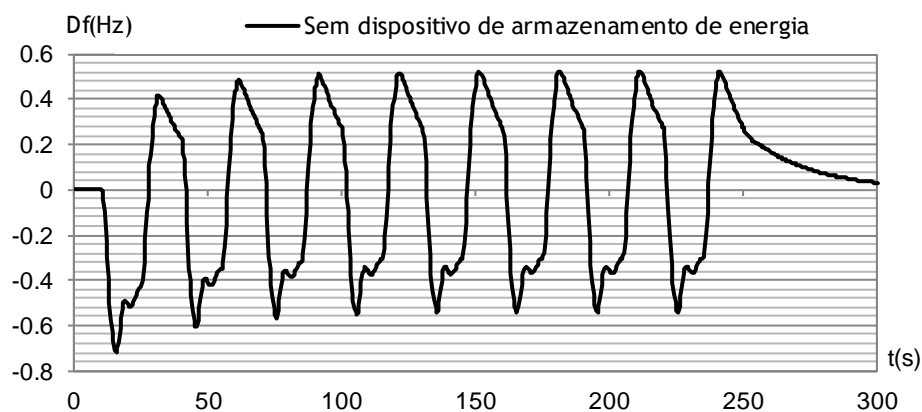


Figura 4.10 - Desvio de frequência do sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 2 sem instalação de um sistema de armazenamento de energia

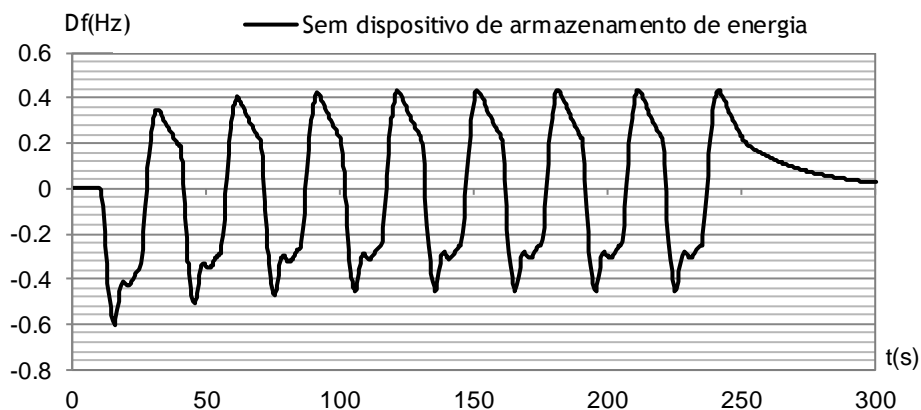


Figura 4.11 - Desvio de frequência do sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 3 sem instalação de um sistema de armazenamento de energia

Analisando as figuras anteriores, facilmente se constata que o limite de $\pm 0,3$ Hz é sistematicamente violado durante todo o período de tempo em que ocorre cada uma destas perturbações do tipo frequente, pelo que a qualidade de serviço no que diz respeito ao desvio de frequência não é assegurada. Portanto, conclui-se que é necessária a instalação de um sistema de armazenamento de energia para melhoria da estabilidade de frequência na rede em estudo.

4.6 - Resultados das Simulações

Na secção anterior foram apresentadas as perturbações que foram consideradas nas simulações. Assim, o passo que se seguiu foi correr a aplicação criada em ambiente *MatLab*[®] e encontrar o dimensionamento ótimo do sistema de armazenamento de energia a instalar na rede em estudo. Seguindo a nomenclatura utilizada na secção 3.3, os valores ou intervalo de valores dos parâmetros considerados e introduzidos na aplicação são apresentados na **Tabela 4.7**.

Tabela 4.7 - Valores dos parâmetros introduzidos na aplicação

Valores do parâmetros introduzidos na aplicação	
Sistema de Armazenamento de Energia	Volante de Inércia
Custo _p (€/MW)	200.000 ¹
Custo _E (€/MWs)	333,33 ¹
P _n (p.u.)	∈ {0,05; 0,1; 0,15; 0,2}
S _b (MVA)	10
E (MWs)	∈ [0; 20]
D _f (perturbação 1) (Hz)	∈ [-1,3; 1,3]
D _f (perturbação 2 e 3) (Hz)	∈ [-0,3; 0,3]
Tempo máximo (perturbação 2 e 3) (s)	50
BM (Hz)	∈ [0,1; 0,7]
R _{df} (Hz)	∈ [0,5; 3]

De referir que todas as simulações utilizaram como valores dos parâmetros introduzidos na aplicação, os valores presentes na tabela anterior. Tal como foi dito anteriormente, o EPSO não garante que o valor encontrado seja o ótimo, por isso de forma a aproximar o mais possível o resultado obtido do ótimo, realizaram-se 100 iterações do algoritmo com 100 partículas cada.

Os custos associados à potência e à capacidade de armazenamento de energia presentes na **Tabela 4.7** foram obtidos através da conversão dos valores mínimos presentes na secção 2.2.

Nas subsecções seguintes são apresentados os resultados obtidos pelo algoritmo de otimização, que minimizam o custo de investimento e que garantem a estabilidade de frequência do sistema face às respetivas perturbações. Nestes resultados as características obtidas para o volante de inércia apresentam-se arredondados à quarta casa decimal.

4.6.1 - Perturbação 1 - Saída Intempestiva de Toda a Produção Fotovoltaica

Nesta subsecção pretende-se determinar características do volante de inércia ótimo que garante estabilidade de frequência do sistema face à saída intempestiva de toda a produção fotovoltaica. Após a utilização da aplicação, obtiveram-se os seguintes resultados:

Tabela 4.8 - Características do volante de inércia ótimo face à perturbação 1

Caraterísticas do volante de inércia ótimo obtido	
P _n (MW)	1
E (MWs)	1,0424
R _{df} (Hz)	1,6989
BM (Hz)	0,6967
Custo Total (€)	200.347

¹ Valor mínimo referido na secção 2.2

O volante de inércia dimensionado, tal como já foi referido, pode ter maior capacidade de armazenamento sem que isso signifique a perda de segurança. Por isso, a característica da energia pode ser sobredimensionada, adequando-se às soluções existentes no mercado.

Para este dispositivo, a evolução do desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 1 apresenta-se na **Figura 4.12**.

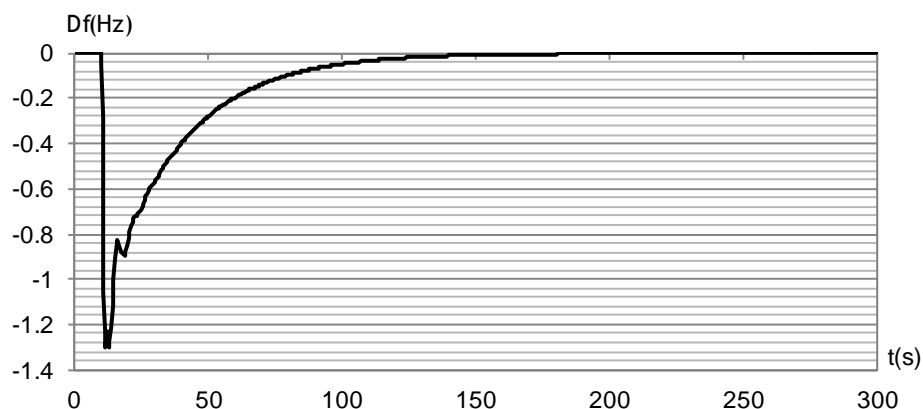


Figura 4.12 - Desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 1 com instalação do volante de inércia ótimo

Embora graficamente não dê para ter certeza que a condição de segurança seja assegurada, observando, numericamente, a evolução do desvio de frequência do sistema verifica-se que, embora à tangente, o limite de segurança não é violado. Assim, estamos na presença de um sistema seguro face à perda intempestiva de toda a produção fotovoltaica.

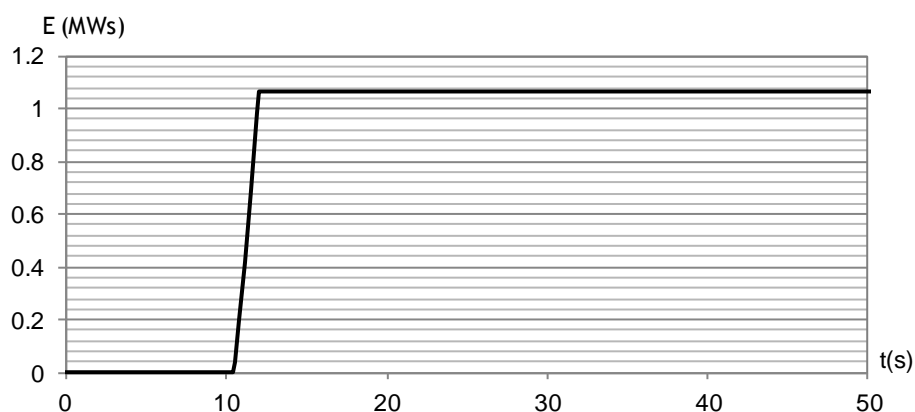


Figura 4.13 - Energia libertada pelo volante de inércia durante a ocorrência da perturbação 1

Observando a **Figura 4.13**, verifica-se que o volante de inércia apenas trabalha cerca de 2 segundos após a ocorrência da perturbação, isto deve-se ao facto de esgotar a sua energia armazenada. Este curto espaço de tempo em funcionamento é o suficiente para que o sistema não viole a condição de segurança, dado que os geradores térmicos imediatamente assumem a perda de produção dos parques fotovoltaicos, devido à elevada reserva girante existente (cerca de 7 MW, 3,5 MW em cada um dos geradores em serviço).

4.6.2 - Perturbação 2 - Variações Intermitentes de Toda a Produção Renovável

A perturbação 2 consiste em variações frequentes da produção renovável. Ao utilizar a aplicação para esta perturbação, obtiveram-se os seguintes resultados para as características do volante de inércia ótimo:

Tabela 4.9 - Características do volante de inércia ótimo face à perturbação 2

Caraterísticas do volante de inércia ótimo obtido	
P_n (MW)	1
E (MWs)	14,2662
R_{df} (Hz)	0,7764
BM (Hz)	0,1
Custo Total (€)	204.755

Relativamente à perturbação 1, verifica-se que esta perturbação é mais exigente em termos de capacidade de armazenamento de energia do sistema e daí que o custo total seja superior. Para este tipo de perturbação não faz sentido que a frequência de Banda Morta do sistema, seja igual ao superior a 0,3 Hz, dado que para esses valores o sistema garantidamente deixa de ser seguro. Por isso é boa prática, para este tipo de perturbação, limitar o seu valor máximo a 0,3 Hz, dado que diminui o espaço de pesquisa do EPSO.

A evolução do desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 2 apresenta-se na **Figura 4.14**.

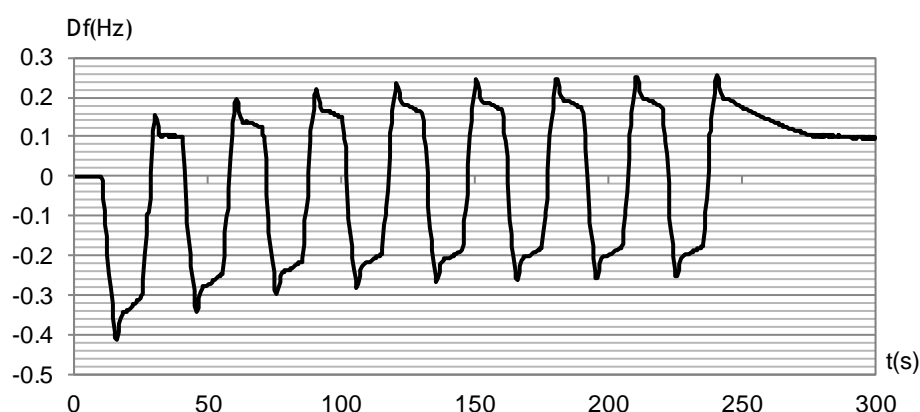


Figura 4.14 - Desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 2 com instalação do volante de inércia ótimo

Como se pode observar na **Figura 4.14**, as condições de segurança enunciadas para este tipo de perturbação são garantidas, embora graficamente não seja visível, devido à linha grossa do gráfico.

De seguida é apresentada a **Figura 4.15** onde está representado o gráfico correspondente à energia libertada pelo volante de inércia dimensionado.

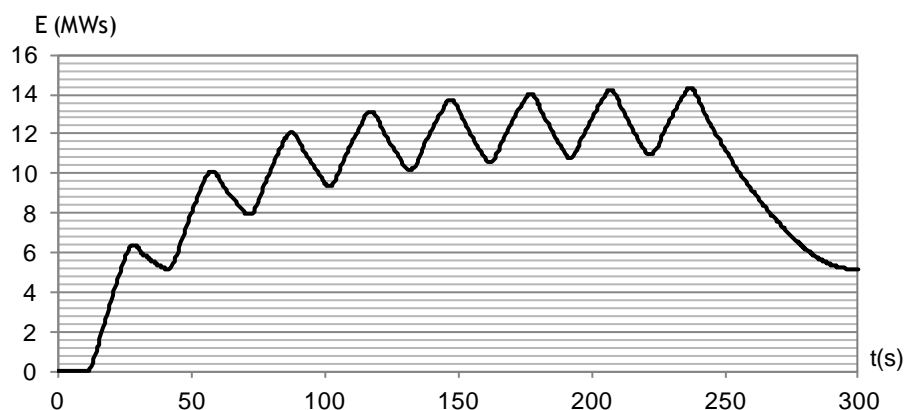


Figura 4.15 - Energia libertada pelo volante de inércia durante a ocorrência da perturbação 2

Como se pode observar na **Figura 4.15**, a energia libertada pelo volante de inércia acompanha as variações do desvio de frequência, isto é, quando o desvio varia no sentido de se tornar positivo, significa que o valor da produção está a aumentar em relação ao valor da carga e, portanto, o volante de inércia "absorve" energia. Por outro lado, no caso do desvio de frequência se tornar negativo, acontece o oposto, ou seja, o volante liberta energia armazenada para compensar a diminuição da produção face ao consumo.

4.6.3 - Perturbação 1 e 3 - Saída Intempestiva e Variação Intermitente da Produção Fotovoltaica

Nesta subsecção pretende-se determinar características do volante de inércia ótimo que garante estabilidade de frequência do sistema face à saída intempestiva de toda a produção fotovoltaica bem como perante variações frequentes da produção fotovoltaica. Após a utilização da aplicação, obtiveram-se os seguintes resultados:

Tabela 4.10 - Características do volante de inércia ótimo face à perturbação 1 em conjunto com a perturbação 3

Caraterísticas do volante de inércia ótimo obtido	
P_n (MW)	1
E (MWs)	6,9958
R_{df} (Hz)	1,3467
BM (Hz)	0,1012
Custo Total (€)	203.332

O volante de inércia dimensionado pode ter maior capacidade de armazenamento sem que isso signifique a perda de segurança. Por isso, a característica da energia pode ser sobredimensionada, adequando-se às soluções existentes no mercado.

A evolução do desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 1 e da perturbação 3 apresentam-se, respetivamente, na **Figura 4.16** e **Figura 4.17**.

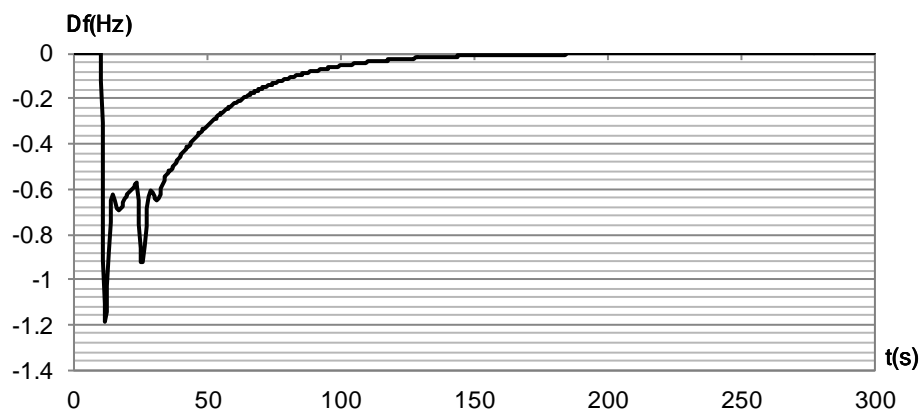


Figura 4.16 - Desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 1 com instalação do volante de inércia ótimo

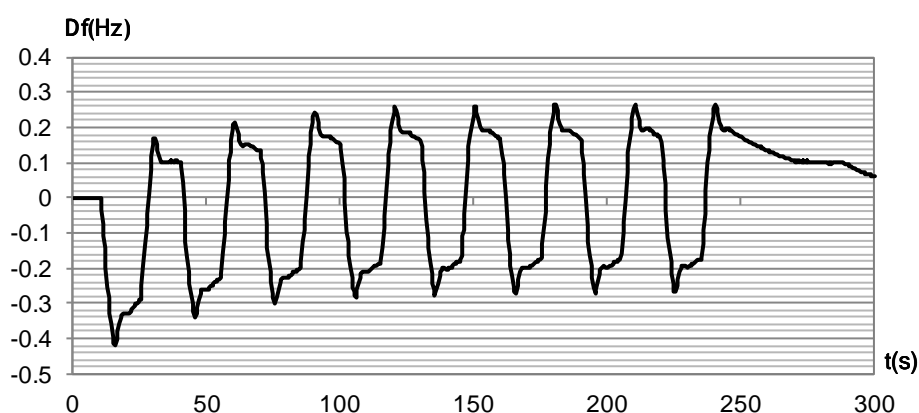


Figura 4.17 - Desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 3 com instalação do volante de inércia ótimo

Como se pode observar nas figuras anteriores, as condições de segurança enunciadas são asseguradas, embora graficamente não seja visível, devido à linha grossa do gráfico da perturbação 3. Por isso, a solução encontrada é considerada válida.

Na **Figura 4.18** e **Figura 4.19** estão representados os gráficos correspondentes à energia libertada pelo volante de inércia dimensionado para a perturbação 1 e perturbação 3, respetivamente.

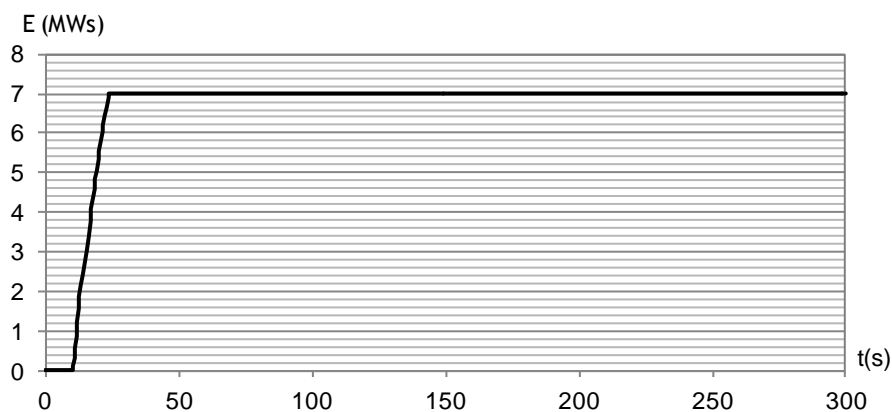


Figura 4.18 - Energia libertada pelo volante de inércia durante a ocorrência da perturbação 1

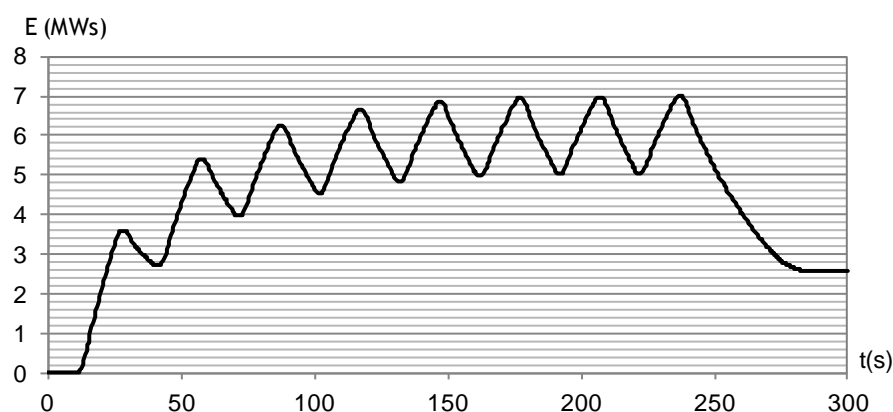


Figura 4.19 - Energia libertada pelo volante de inércia durante a ocorrência da perturbação 3

Neste caso, a capacidade de armazenamento de energia é condicionada pela perturbação 3, dado que para cumprir os requisitos de segurança unicamente da perturbação 1, não necessitaria de uma capacidade de energia armazenada tão elevada.

A inclusão desta solução permite ver a diferença de dimensionamento necessário se não quisermos entrar com as perturbações provocadas pelos parques eólicos. Na subsecção seguinte é apresentada a solução incluindo as variações frequentes na produção eólica.

4.6.4 - Perturbação 1 e 2 - Saída Intempestiva da Produção Fotovoltaica e Variação Intermitente de Toda a Produção Renovável

Esta simulação difere da anterior, na medida em que, para além das variações frequentes na produção fotovoltaica, a perturbação 2 inclui variações frequentes na produção eólica, tratando-se por isso de uma perturbação mais exigente, do ponto de vista de segurança do sistema. Dessa forma, os resultados obtidos para o dimensionamento ótimo do volante de inércia que evita problemas de estabilidade de frequência na rede em estudo, são os seguintes:

Tabela 4.11 - Características do volante de inércia ótimo face à perturbação 1 em conjunto com a perturbação 2

Caraterísticas do volante de inércia ótimo obtido	
P_n (MW)	1
E (MWs)	14,2716
R_{df} (Hz)	0,7754
BM (Hz)	0,1007
Custo Total (€)	204.757

Relativamente à simulação anterior, verifica-se que a capacidade de armazenamento de energia é superior e, conseqüentemente, o custo total também. Isto resulta do facto da perturbação 2 ser mais exigente e necessitar de maior capacidade de energia armazenada no volante de inércia, para poder garantir as condições de segurança enunciadas.

A evolução do desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 1 e da perturbação 2 apresentam-se, respetivamente, na **Figura 4.20** e **Figura 4.21**.

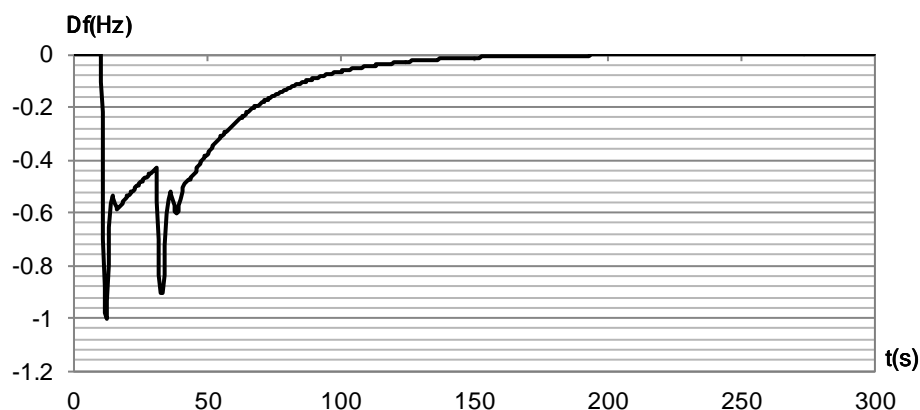


Figura 4.20 - Desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 1 com instalação do volante de inércia ótimo

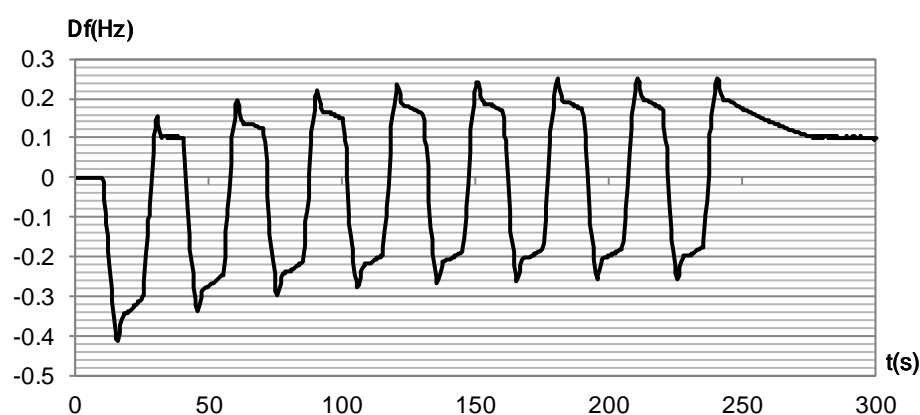


Figura 4.21 - Desvio de frequência sofrido pelo sistema perante a ocorrência da perturbação 2 com instalação do volante de inércia ótimo

Do ponto de vista de segurança, a solução é válida, uma vez que as condições de segurança para ambas as perturbações são asseguradas, embora graficamente não seja visível, devido à linha grossa do gráfico relativo à perturbação 2.

Em seguida, são apresentados os gráficos correspondentes à energia libertada pelo volante de inércia dimensionado para a perturbação 1 e perturbação 2.

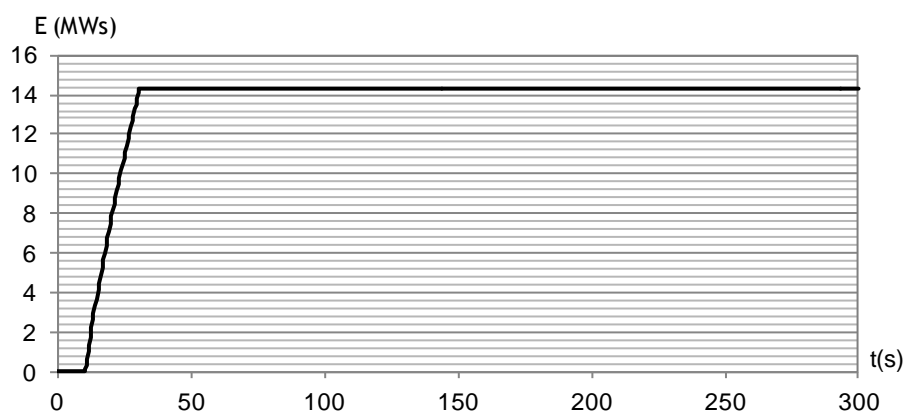


Figura 4.22 - Energia libertada pelo volante de inércia durante a ocorrência da perturbação 1

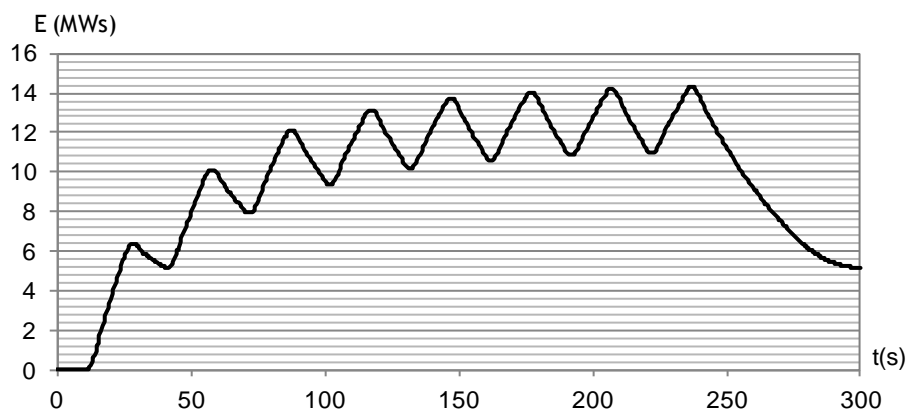


Figura 4.23 - Energia libertada pelo volante de inércia durante a ocorrência da perturbação 2

A capacidade de armazenamento de energia do volante de inércia é condicionada, essencialmente, pela perturbação 2 e isso reflete-se no custo total do dispositivo. Ao realizar este tipo de dimensionamento numa rede isolada será fundamental estudar que tipos de perturbação podem acontecer e a sua intensidade. Esta estratégia poderá permitir uma poupança significativa no custo de investimento inicial. Neste caso em particular, a diferença acaba por não ser significativa, mas há que ter em conta que foi utilizado o valor mínimo do custo associado à energia do volante de inércia, caso contrário esta diferença seria muito mais significativa.

4.7 - Conclusões

Ao longo do Capítulo 4 procurou-se descrever o caso de estudo utilizado para testar a aplicação desenvolvida. A rede isolada em estudo possui características reais, fornecidas pela orientadora, sendo descritas neste capítulo.

Na secção 4.1 é descrita a constituição da rede isolada, nomeadamente, as potências instaladas e características dos geradores térmicos, parques eólicos e parques fotovoltaicos.

Na secção 4.2 é caracterizado o despacho, nomeadamente, o cenário de carga considerado, a produção dos parques eólicos e fotovoltaicos e são analisadas todas as soluções possíveis de pré-despacho da central térmica.

A secção 4.3 descreve o modelo dinâmico utilizado para o regulador de velocidade utilizado nos grupos Diesel para fazer o controlo primário e secundário da frequência.

Na secção 4.4 é ilustrado o modelo dinâmico que foi utilizado no *Simulink*[®], sendo de referir que se trata do modelo simplificado do SEE, de barramento único.

Os tipos de perturbações considerados consistem em variações frequentes da produção renovável ou saída intempestiva de toda a produção fotovoltaica, e são apresentados na secção 4.5.

Os resultados das simulações efetuadas são apresentados na secção 4.6, mostrando as características do volante de inércia dimensionado, assim como a resposta dinâmica obtida para o sistema perante a ocorrência das diferentes perturbações em análise, considerando em serviço o volante de inércia dimensionado. Estes resultados mostram que em todos os conjuntos de perturbações considerados, o algoritmo foi capaz de encontrar uma solução ótima de dimensionamento do volante de inércia capaz de garantir a segurança dinâmica do sistema elétrico. Todos os resultados de dimensionamento obtidos foram validados

recorrendo à simulação dinâmica das perturbações no modelo em *Simulink*[®], demonstrando assim a qualidade dos resultados obtidos.

Por último, refira-se que o tempo necessário pelo método de otimização para encontrar uma solução ótima depende muito do número de iterações do algoritmo, do número de perturbações consideradas e da capacidade de processamento do computador utilizado, podendo por isso demorar alguns minutos ou algumas horas. Nos casos apresentados neste capítulo com 100 iterações e 100 partículas por iteração, demorou cerca de 4 horas para as simulações que envolviam apenas um tipo de perturbação e cerca de 6 horas para as restantes.

Capítulo 5

Conclusões e Possível Trabalho Futuro

5.1 - Principais Contribuições

A principal contribuição deste trabalho foi a criação de uma aplicação para minimizar o custo de investimento de um sistema de armazenamento de energia a instalar num sistema isolado de pequena dimensão, em que a maioria da parte da produção é assegurada através de fontes renováveis. O interesse da instalação deste tipo de dispositivos consiste em regular o valor da frequência, proporcionando qualidade de serviço e evitando o deslastre de carga no caso de falha da produção renovável. Esta falha de produção renovável, designada de perturbação ao longo do trabalho, condiciona o dimensionamento do sistema de armazenamento de energia, pelo que torna-se vital identificar e caracterizar as perturbações, da forma mais real possível. Esta estratégia pode permitir uma poupança significativa no custo de investimento do sistema.

A confirmação da necessidade de instalar dispositivos de armazenamento de energia de resposta rápida para melhorar a estabilidade de frequência de uma rede isolada, visível no caso de estudo analisado, é outra contribuição deste trabalho.

5.2 - Perspetivas de Desenvolvimento

Uma perspetiva de desenvolvimento seria comparar todas as opções tecnológicas existentes no mercado, capazes de fornecer qualidade de serviço aos sistemas isolados, e avalia-las do ponto de vista económico. Para isso, seria necessário realizar uma avaliação económica, incluindo todos os custos associados aos sistemas de armazenamento de energia durante o seu período de vida útil e não apenas o seu custo de investimento. Isso permitiria ter uma noção mais aproximada do investimento total que cada tecnologia implica e, dessa forma, comparar as diferentes tecnologias.

Outra perspetiva de desenvolvimento seria incluir na aplicação desenvolvida a possibilidade do utilizador alterar o sistema elétrico de energia, nomeadamente, alterando o número de gerados térmicos em serviço e a sua potência instalada, o cenário de carga e personalizar o tipo de perturbação que se pretenda simular. Assim, a aplicação seria totalmente moldável e adequável a qualquer rede isolada. Atualmente, o mesmo pode ser feito alterando

"à mão" o diagrama de blocos do *Simulink*[®], no entanto a perspectiva apresentada seria fazer essas alterações a partir da aplicação.

Referências

- [1] Carlos Moreira, "*Identification and Development of MicroGrids Emergency Control Procedures*", chapters 1-4, Julho de 2008.
- [2] António Joyce, 'O solar fotovoltaico de concentração', *renováveis magazine*, 1º trimestre de 2010, pp. 24-29.
- [3] Chet Lions, "*A Smart Grid Approach To Regulation And Ramping*", 2009.
- [4] N. Hamsic, A. Schmelter, A. Mohd, E. Ortjohan, E. Schultze, A. Tuckey, J. Zimmermann, "*Increasing renewable energy penetration in isolated grids using a flywheel energy storage system*", in *Proc. of International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, Abril 2007.
- [5] J. A. Pecas Lopes, "Gestão de Serviços de Sistema", Apontamentos de apoio à disciplina de "Produção e Transporte de Energia 2", FEUP, 2002/2003.
- [6] Rastler, D.; "*Electricity Energy Storage Technology Options*", *Electric Power Research Institute (EPRI) - Update Técnico*, Cap. 2-4, pp. 49-114, Dezembro de 2010.
- [7] Eyer, J.; Corey, G.; "*Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide*", Relatório *Sandia National Laboratories*, Fevereiro de 2010, EUA.
- [8] Z. A. Styczynski, P. Lombardi, R. Seethapathy, M. Piekutowski, C. Ohler, B. Roberts, S. C. Verma, "*Electric Energy Storage and its Tasks in the Integration of Wide-Scale Renewable Resources*", *Integration of Wide-Scale Renewable Resources Into the Power Delivery System*, 2009 CIGRE/IEEE PES Joint Symposium, 29-31 Julho 2009.
- [9] Gonzalez, A; et al.; "*Study of Electricity Storage Technologies and Their Potential to Address Wind Energy Intermittency in Ireland*"; *Sustainable Energy Research Group*, Maio de 2004.
- [10] Gyuk, I.; Mears, L.; Gotshall, H.; Kamath, H.; "*EPRI-DOE Handbook of Energy Storage for Transmission and Distribution Applications*", Relatório Final, Cap.2-5, pp.47-146, Dezembro de 2003, EUA.
- [11] Pena-Alzola, R.; Sebastian, R.; Quesada, J.; Colmenar, A.; "*Review of flywheel based energy storage systems*," *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, 2011 *International Conference*, pp.1-6, 11-13, Maio de 2011.
- [12] Peters R., O'Malley L., "*Storing renewable power*", *The Pembina Institute - Universidade de York*, Junho de 2008.
- [13] Powercorp, "PowerStore Product Specification", version 20071108.

- [14]Walawalkar, Rahul & Apt, Jay, "Market Analysis of Emerging Electric Energy Storage - Final Report", DOE/NETL, pp. 1-52, 31 Julho de 2008, EUA.
- [15]Schoenung, S.; "Energy Storage Systems Cost Update", Relatório dos Laboratórios SANDIA, Abril de 2011, EUA.
- [16]The Electricity Advisory Committee; "Bottling Electricity: Storage as a Strategic Tool for Managing Variability and Capacity Concerns in the Modern Grid", Dezembro de 2008.
- [17]EPRI - Electric Power Research Institute; "Energy Storage Projects & Demos" [Online]. Disponível em: www.disgen.epri.com -> Downloads -> Energy Storage Project Demos 2011/2012, acedido em Março de 2013.
- [18]Baxter R.; "Energy Storage - A Nontechnical Guide", Oklahoma, PennWell Corporation, Outubro de 2006.
- [19]Oudalov, A.; Chartouni, D.; Ohler, C.; Linhofer, G.; "Value Analysis of Battery Energy Storage Applications in Power Systems," Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES, pp.2206-2211, Novembro de 2006.
- [20]Naish C. et al., 2010, "Outlook of energy storage technologies", IP/A/ITRE/FWC/2006-087/Lot4/C1/SC2, Outubro de 2006.
- [21]Rantik M.; "Life cycle assessment of five batteries for electric vehicles under different charging regimes", Universidade de Chalmers, Dezembro de 1999.
- [22]Connolly, David; "A Review of Energy Storage Technologies for the integration of fluctuating renewable energy", Universidade de Limerick, Agosto de 2009, Irlanda.
- [23]Vergels. F. et al.; "An Assessment of Sustainable Battery Technology", Universidade de Bruxelas, Journal of Power Sources, Janeiro de 2005.
- [24]Nourai, A.; "Installation of the First Distributed Energy Storage System (DESS) at American Electric Power (AEP)", Relatório Técnico do Department of Energy - Laboratórios SANDIA, Junho de 2007.
- [25]Rastler. D.; "Overview of Electric Energy Storage Options for the Electric Enterprise"; Electric Power Research Institute (EPRI), Fevereiro de 2009.
- [26]Swierczynski, M; Teodorescu, R; Rodriguez, P; "Lifetime Investigations of a Lithium iron phosphate (LFP) Battery System Connected to a Wind Turbine for Forecast improvement and Output Power Gradient Reduction", International Stationary Battery Conference, Maio de 2011.
- [27]Eyer, J.; Iannucci, J; Butler, P.; "Estimating Electricity Storage Power Rating and Discharge Duration for Utility Transmission and Distribution Deferral", Relatório Sandia National Laboratories - DOE, Novembro de 2005.
- [28]Vartanian, C.; "Grid stability battery systems for renewable energy success," Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE, pp.132-135, 12-16, Setembro de 2010.
- [29]Conte, M. "Supercapacitors technical requirements for new applications". Fuel Cells, vol.5, pp. 806-818, Outubro de 2010.
- [30]"Supercondensadores", www.mpoweruk.com -> Energy Storage -> Battery Types -> Capacitors & Supercapacitors, acedido em Março de 2013.
- [31]Miller, J., Burke, A.; "Electrochemical Capacitors: Challenges and Opportunities for Real-World Applications"; Abril de 2008.
- [32]Maria Helena Vasconcelos, "Controlo de frequência-potência", Apontamentos das aulas teóricas da unidade curricular de DESI, FEUP, 2012/2013.

- [33]H. Vasconcelos, J. A. Peças Lopes, *"Flywheel Sizing for the Secure Operation of an Isolated Network with a High Level of Variable Generation"*, presented in the 2nd International Workshop on Integration of Solar Power into Power Systems, Lisbon, November 12-13, 2012.
- [34]Kenney,J. Eberhart, R.C (1995), *"Particle Swarm Optimization"*, IEEE document.
- [35]Vladimiro Miranda, *"Computação Evolucionária - Uma introdução"* versão 2.0, Março 2005.
- [36] Prabha Kundur, *"Power System Stability and Control"*, USA, McGraw-Hill, 1994, Chapters 9, 11.

Anexo A

Manual do Utilizador

Neste anexo apresenta-se o manual do utilizador da aplicação desenvolvida, que tem como objetivo conter toda a informação necessária para que qualquer pessoa que conheça minimamente o que a ferramenta faz, consiga correr a aplicação. Este manual é apresentado nas páginas seguintes.

Manual do Utilizador

Dimensionamento ótimo de sistemas de armazenamento de energia para redes isoladas com elevada integração de produção renovável

Este documento é o Manual do Utilizador da aplicação desenvolvida em ambiente *MatLab®*, no âmbito da unidade curricular Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Universidade do Porto. A aplicação tem como objetivo minimizar o custo de investimento de um sistema de armazenamento de energia a instalar numa rede isolada, com elevada integração de produção renovável. Este tipo de redes merece particular atenção, dado que não estando ligada a uma grande rede é mais difícil fazer com que os valores da frequência se mantenham dentro da gama de valores admissíveis, devido às variações suscetíveis de ocorrer à produção renovável, mas também devido ao baixo valor de inércia do sistema.

A elevada integração de energias renováveis nas redes isoladas, tipicamente ilhas, surge num contexto bastante favorável: os preços dos combustíveis fósseis começam a ter oscilações cada vez mais frequentes; os seus custos de transporte mantêm-se elevados e as preocupações ambientais são cada vez maiores. Contudo, nem tudo são vantagens, este tipo de produção de energia elétrica levanta algumas preocupações quanto à sua integração nas redes, devido às intermitências de grande amplitude a que está sujeita. Este facto provoca desequilíbrio entre o valor da produção e do consumo e, conseqüentemente, um desvio da frequência relativamente ao seu valor nominal. Esse desvio pode ser de tal ordem que pode pôr em causa a qualidade de serviço da rede ou, em último caso, provocar o deslastre de carga. Para evitar que tal aconteça são instalados, nas redes em questão, sistemas de armazenamento de energia.

Antes de iniciar o programa

Tal como referido anteriormente, a aplicação foi desenvolvida em ambiente *MatLab®* versão R2010a, pelo que deve ter este programa instalado no seu computador para poder iniciá-la. De forma a funcionar corretamente, deve possuir os seguintes ficheiros na mesma pasta: "A.mdl"; "C50.mdl"; "C50_alterado.mdl"; "programa_VI.m"; "f_evaluation_v1_1.m" e "epso_matrix2". Em seguida, para iniciar a aplicação deve abrir o ficheiro "programa_VI.m" e carregar no botão "Run".

Entrada de dados

1. Inicialmente, deve inserir o tipo de perturbação que se pretende efetuar. Devendo inserir:
 - "1" para dimensionar o dispositivo de armazenamento de energia perante a ocorrência de uma perturbação severa no sistema, isto é, saída intempestiva de toda a produção fotovoltaica (A.mdl);
 - "2" para dimensionar o dispositivo de armazenamento de energia perante a ocorrência de uma perturbação frequente no sistema, isto é, variações frequentes da produção renovável (C50.mdl);
 - "3" para dimensionar o dispositivo de armazenamento de energia perante a ocorrência da perturbação severa (nº1) ou perturbação frequente (nº2) (A.mdl e C50.mdl);

- "4" para dimensionar o dispositivo de armazenamento de energia perante a ocorrência da perturbação severa ou frequente, esta última apenas com variações frequentes na produção fotovoltaica (A.mdl e C50_alterado.mdl);

2. Escolher os valores iniciais dos parâmetros do sistema de armazenamento de energia.

Nota: Deve-se inserir os valores dentro de parêntesis retos e separados por espaço, tal como é recomendado na aplicação.

- O primeiro valor (P) corresponde à potência nominal do sistema de armazenamento de energia em por unidade da base do sistema do modelo dinâmico (p.u.);
 - O segundo (Df) é o desvio de frequência expresso em Hertz (Hz) do estatismo R ($R=Df/P_n$);
 - O terceiro (BM) representa a banda morta de frequência do sistema de armazenamento de energia, necessária para evitar a atuação do dispositivo para desvios de frequência não significativos, sendo expressa em Hertz (Hz);
 - Por último, o quarto valor (E) corresponde à capacidade de armazenamento de energia em Megawatt-segundo (MWs).
3. Definir os valores mínimos dos parâmetros do sistema de armazenamento de energia, seguindo a nomenclatura anterior.
4. Selecionar os valores máximos dos parâmetros do sistema de armazenamento de energia, de acordo com nomenclatura anterior.
5. Introduzir os valores de potência admissíveis para a potência nominal do dispositivo, dentro de parêntesis retos e separados por espaço. O utilizador poderá introduzir quantos valores pretender, pela ordem que quiser e deve incluir o valor mínimo e máximo definido anteriormente.
6. Inserir o limite máximo permitido para os desvios transitórios de frequência do sistema, em Hertz, para a perturbação severa e/ou frequente (um limite diferente para cada tipo de perturbação). Não deve introduzir números negativos.
7. Introduzir o tempo máximo, em segundos, durante o qual o sistema pode violar o limite anterior, a contar desde os 0 segundos, no caso de se tratar de uma perturbação frequente. Não deve introduzir números negativos (opção que é pedida apenas se foi selecionada uma perturbação frequente.).
8. Definir o custo associado à potência do dispositivo, expresso em euros por Megawatt (€/MW). Não deve introduzir números negativos.
9. Definir o custo associado à energia do dispositivo, expresso em euros por Megawatt-segundo (€/MWs). Não deve introduzir números negativos.

Saída de Dados

Após a introdução de todos os dados, a aplicação irá correr. Uma vez terminada de correr, são fornecidos os valores do dimensionamento ótimo do dispositivo de armazenamento de energia no *Workspace* do *MatLab*® através da variável "X_optimo", da seguinte forma $X_optimo=[P(p.u); Df(Hz); BM(Hz); E(MWs)]$, enquanto o seu custo de investimento será o último valor a aparecer na janela de comando do *MatLab*®.